## МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

## ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет»

Н.И. ЖЕЖЕРА

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

Рекомендовано Ученым советом Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» в качестве учебного пособия для аспирантов и студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по специальностям «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Системы автоматизированного проектирования»

Оренбург 2005

#### УДК 681.5:620.165.29.008.6 (075.8) ББК 32.965я7 Ж 43

#### Рецензенты

кафедра систем автоматизации производства Оренбургского государственного университета (зав. кафедрой доктор технических наук, профессор Н.З. Султанов);

зав. кафедрой промышленной автоматики Уфимского государственного авиационного технического университета доктор технических наук, профессор Н.И. Тюков

Жежера Н. И.

Ж 43

Автоматизация испытаний изделий на герметичность [Текст]: учебное пособие / Н.И.Жежера. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. – 475 с.

#### **ISBN**

Приведены анализ устройств испытаний изделий на герметичность и разработанные способы, устройства и производственные линии автоматизированных испытаний изделий на герметичность. Рассматриваются теоретические положения по расчету и моделированию динамических свойств измерительных элементов, устройств как объектов автоматического управления, исполнительных устройств и цифровых САУ, обеспечивающих автоматизированный контроль герметичности изделий. Установленные положения являются основой проектирования автоматизированных систем испытаний с контролем герметичности изделий по утечкам пробной среды.

Учебное пособие предназначено для аспирантов и студентов специальностей 210200 и 220300 – «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Системы автоматизированного проектирования», а также для научных работников и инженеров при проектировании автоматизированных систем испытаний изделий на герметичность.

2103000000 Ж----- ББК 32.965я7

© Жежера Н.И., 2005 © РИК ГОУ ОГУ, 2005

**ISBN** 

#### Введение

Одним из основных направлений научно-технического прогресса является создание и внедрение в производство новых технологических процессов и более совершенных машин и оборудования.

Полые изделия имеют широкое применение в различных отраслях народного хозяйства: машиностроении, химической, нефтегазовой, пищевой и на подвижных объектах. К полым изделиям относятся трубопроводы для транспортирования рабочих сред и стационарные сосуды различного давления и назначения на промышленных предприятиях, сосуды на подвижной технике, например, автомобильные и тракторные баки для топлива или минерального масла и автотракторные теплообменники, теплообменники в системах отопления и вентиляции, баллоны для сжиженного кислорода, ацетилена или гелия, железнодорожные углеводородные или другого назначения цистерны, запорная и предохранительная арматура, например, вентили, задвижки, шаровые краны и предохранительные клапаны.

Полые изделия в процессе производства и эксплуатации подвергаются испытаниям на герметичность. Эти испытания сопровождаются тяжелыми условиями труда и недостаточной точностью контроля герметичности. Требования к изделиям по точности контроля герметичности возрастают и для многих типов изделий нормируются государственными стандартами или отраслевыми нормалями.

Испытания на герметичность изделий является одной из проблем науки и техники. В условиях производства почти полностью отсутствуют апробированные установки и устройства автоматизированных испытаний на герметичность изделий серийного изготовления. Фактически каждое предприятие такие установки проектирует и изготавливает самостоятельно. В научно - технической литературе отсутствуют результаты теоретических и экспериментальных исследований по проектированию устройств и систем для испытаний на герметичность изделий, выбору рациональных соотношений элементов устройств, по методике проведения и оценки испытаний изделий на герметичность.

Испытания изделий на герметичность во многих случаях проводят путем подвода в изделие сжатого воздуха и погружения изделия в резервуар с водой. По выходящим из изделия в воду пузырькам сжатого воздуха делают заключение о герметичности изделия. В других случаях, например, при испытаниях железнодорожных цистерн, вода подается внутрь ее. Однако, как установлено теоретическими и экспериментальными исследованиями, при таком контроле герметичности изделий не могут быть обнаружены микрощели с условным диаметром менее 2,42 мкм при подводе сжатого воздуха внутрь изделия под давлением, равным 0,12 МПа.

Связано это с возникновением гидравлического затвора в микрощелях от воздействия сил поверхностного натяжения и гидростатического давления столба воды. Поэтому в эксплуатацию могут поступать изделия с микрощелями. Причем испытания изделий на герметичность производятся при статических давлениях, а в реальных условиях большинство изделий работают при

знакопеременных нагрузках и утечки через микрощели существенно интенсифицируются.

В книге обобщен опыт работы автора по разработке и исследованию способов и устройств автоматизированных испытаний на герметичность изделий. В первом разделе приводится анализ литературных источников по испытаниям на герметичность изделий, рассмотрены виды изделий и методы их испытаний, оборудование и технологии, используемые на предприятиях различных отраслей промышленности при испытаниях изделий на герметичность.

При проектировании автоматизированных систем для испытаний на герметичность изделий, например, в условиях серийного производства или эксплуатации необходимо иметь предварительные данные о количестве негерметичных изделий, причинах возникновения и сложности устранения негерметичности изделий. Поэтому во втором разделе приведены результаты статистических исследований и паспортизации неплотностей автотракторных теплообменников при испытаниях на герметичность в условиях производства и предохранительных и перепускных клапанов гидравлических систем испытаний, поступающих в ремонт после потери работоспособности в условиях эксплуатации.

В третьем разделе отражается развитие теории и совершенствование методов, способов и устройств автоматизированного контроля герметичности изделий при испытаниях пузырьковым, манометрическим и гидростатическим методами. На основе математических моделей проведена сравнительная оценки расхода газа или подогретого газа через микрощели в атмосферу, жидкость или подогретую жидкость, выявлены диапазоны применимости и причины неудовлетворительной работоспособности существующих устройств контроля герметичности, проведено их усовершенствование применительно к автоматизированным системам контроля герметичности. Разработан принцип получения информации и автоматизированного контроля герметичности изделий при периодических возмущениях контролируемого или взаимосвязанного параметра в устройстве испытаний.

Для пузырькового метода с камерным дифференциальным способом реализации применительно к автоматизированному контролю герметичности изделий исследованы чувствительность и производительность процесса испытаний в зависимости от конструктивных параметров и режимов работы пузырьковой камеры, габаритных размеров и состояния испытываемого изделия, объема эталонной емкости и характеристик жидкости, находящейся в пузырьковой камере. Рассмотрен процесс начальной настройки автоматизированных испытательных устройств путем дросселирования части газа из изделия и сообщения периодических возмущений давления газа в устройстве в процессе испытаний изделий.

Для манометрического метода испытаний изделий с компрессионным способом реализации с использованием горизонтальной трубки с жидкостным поршнем исследованы: влияние диаметра горизонтальной трубки на формирование жидкостного поршня в ней и касательные напряжения в ламинарном пограничном слое жидкости; расход газа через горизонтальную трубку, ее проводимость и гидравлическое сопротивление; статические погрешности контроля герметичности по утечкам газа и выбор объема эталонной емкости; время запаздывания; оценка динамической погрешности контроля герметичности по утечкам газа с учетом накопления отклонений при контроле; расход газа и уравнения движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке; соотношения для устройства испытаний изделий с использованием изменяемых дополнительных емкостей.

Для гидростатического метода испытаний изделий на герметичность разработаны новые способы реализации гидростатического метода испытаний изделий на герметичность, позволяющие автоматизировать процессы испытаний: пузырьковый камерный, дифференциальный с использованием эталонной емкости, заполненной жидкостью и присоединенной к упругой емкости, заполненной газом, и способ испытаний изделий с использованием перегретого водяного пара. Разработаны соотношения по выбору геометрических размеров эталонных емкостей, присоединенных камер и упругих емкостей при равных или не равных давлениях пробной жидкости и индикаторного газа.

В четвертом разделе рассматриваются математические описания основных типовых устройств систем испытаний на герметичность как объектов автоматического управления. Математическое описание объектов автоматического управления, например, работающих на жидкости, рассмотрено с учетом поступления в объект газожидкостной смеси с различным соотношением газовой и жидкостной фаз. Такой теоретический подход позволяет с единых позиций рассматривать большое многообразие изделий, испытываемых на герметичность, как объектов автоматического управления, работающих на газообразной, жидкостной или газожидкостной среде, при проектировании автоматизированных систем испытаний. Полученные дифференциальные уравнения устанавливают взаимосвязь основных технологических и конструктивных параметров объектов управления и особенно отражают взаимосвязь и взаимовлияние уровня жидкости и давления газовой среды в объекте. Разработана математическая модель прогрева изделия перед его испытаниями на герметичность перегретым водяным паром.

В пятом разделе рассмотрены методы и их математические обоснования, направленные на повышение ресурса герметичности и качества работы элементов автоматизированных систем испытаний на примерах гидравлических затворов, регулирующих и предохранительных клапанных устройств. Проведено математическое моделирование распределения давления в сопряжениях клапан–седло в зависимости от приложенного перепада давления, геометрической формы деталей сопряжения и скорости возвратно-поступательного перемещения клапана относительно седла. Приведены результаты экспериментальных исследований износа и гидравлической плотности сопряжений клапанседло предохранительных и перепускных клапанов при работе их в различных режимах.

В шестом разделе приведены теоретические положения по проектированию емкостных измерительных преобразователей и электромагнитных сильфонных исполнительных устройств систем автоматического управления амплитудой периодических возмущений давления пробной среды, используемых в автоматизированных системах контроля герметичности изделий по утечкам пробной среды.

В седьмом разделе рассматриваются предложенные принципы построения автоматизированных систем испытаний изделий на герметичность и разработанные системы автоматизированного контроля герметичности изделий по утечкам пробной среды манометрическим, пузырьковым и гидростатическим методами. В восьмом и девятом разделах рассмотрены примеры синтеза и реализации дискретных (цифровых) систем автоматического управления амплитудой возмущений давления пробной среды с ПИ и ПИД регуляторами, которые обеспечивают автоматизированный контроль герметичности изделий по утечкам пробной среды.

В десятом разделе приводятся упрощенные схемы разработанных для конкретных промышленных предприятий автоматизированных линий и участ-ков испытаний изделий на герметичность, например, автотракторных теплообменников с использованием сжатого воздуха и устройств с барботером и ресивером, а также с использованием перегретого водяного пара и устройств обнаружения следов водяного пара в атмосфере вокруг изделия.

Микропроцессорные устройства, которые являются центральной информационно управляющей частью систем испытаний изделий на герметичность, в настоящей работе не рассматриваются потому, что подробно изложены в учебных пособиях автора [1, 2].

# 1 МЕТОДЫ, СПОСОБЫ И УСТРОЙСТВА ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

# 1.1 Изделия, испытываемые на герметичность на промышленных предприятиях

Ежегодно в стране испытывают на герметичность миллионы разнообразных изделий. На сайтах в Интернете можно получить необходимые данные, например, о методах и способах контроля герметичности латунных труб теплообменных аппаратов, дизельной топливной аппаратуры, корпусных деталей двигателей внутреннего сгорания, узлов и деталей трубопроводов из стальных труб, магистральных трубопроводов, трубопроводов газового оборудования автомобилей, газовых заправочных станций пропан - бутаном, газовых раздаточных колонок для заправки автомобилей и газовых баллонов, систем питания автомобилей, двустенных стальных горизонтальных резервуаров, предназначенных для наземного и подземного хранения автомобильных бензинов, дизельного топлива и масел, баллонов сжиженных газов, порошковых огнетушителей, трубопроводной арматуры, кранов, предназначенных для управления потоками молока и молочных продуктов, кранов шаровых на трубопроводах подачи пара, спирта, воды и других жидкостей, контейнеров, используемых в Госатомнадзоре, коробок фильтрующих к противогазам и противогазов, металлической банки, медицинских ампул, топливных баков самолетов, отсеков ракет, обитаемых многоотсечных космических аппаратов и баллистических орбитальных станций, скафандров космонавтов, танков при использовании безвредных или отравляющих веществ, корпусов судов, кораблей и отсеков различного назначения, кузовов легковых автомобилей, автотракторных радиаторов.

Изделия, контролируемые на герметичность, можно классифицировать по назначению, рабочему давлению, которое обычно принимается в качестве контрольного давления при испытаниях изделия на герметичность, геометрическим размерам и рабочей среде, на которой работает изделие.

На рисунке 1.1 в качестве примера приведена упрощенная классификация по назначению испытываемых на герметичность изделий, используемых в различных отраслях народного хозяйства. На рисунке 1.1 испытываемые изделия: топливные баки, теплообменники, корпусные детали двигателей внутреннего сгорания, фильтры, трубопроводы, арматура трубопроводная, клапаны предохранительные и регулирующие и оболочки обозначены номерами 1-8.

### Классификация по назначению изделий, испытываемых на герметичность

|   |          | 1        |  |
|---|----------|----------|--|
| Топливные баки                          | 1        | 1-8      | Легковые и грузовые ав-                      |
| Теплообменники                          | 2        | 1-8      | томооили и автооусы                          |
| Корпусные детали                        | 3        |          | Іракторы и комбаины                          |
| Фильтры                                 | 4        | 1-8      | Экскаваторы, автогрей-<br>деры, бульдозеры   |
| Трубопроводы                            | 5        | 1-8      | Самолеты и вертолеты                         |
| Арматура трубопро-<br>водная            | 6        | 1-8      | Ракеты, космические аппараты морские сула    |
| Клапаны предохра-<br>нительные, регули- | 7        | 5-7      | Магистральные трубо-                         |
| рующие<br>Оболочки                      | 8        | 5-7      | Внутризаводские трубо-                       |
| Емкости нефтепро-<br>дуктов и цистерны  |          | 5-7      | Трубопроводы гидро-<br>пневматических систем |
| железнодорожные                         |          | 2        | Радиаторы отопления<br>зданий и сооружений   |
| Баллоны и их арма-<br>тура              |          | 8        | Железнодорожные цис-<br>терны и вагоны       |
| Огнетушители                            | -        | 8        | Холодильники                                 |
| Пластмассовые ем-                       |          | 7,8      | Скафандры                                    |
| кости                                   |          | 7,8      | Противогазы                                  |
| Ампулы                                  |          | 7,8<br>6 | Шлемы водолазные                             |
| Приборы измери-<br>тельные              |          |          | Нефть Газ. пар                               |
| нин Тара                                | ы на лин | иях один | Вода кот Молоко                              |

Каждый вид изделия, выделенный по назначению и имеющий номер 1-8, входит в такие мобильные объекты как: автобусы; легковые и грузовые автомобили; тракторы, комбайны и другие самоходные сельскохозяйственные машины и оборудование; экскаваторы, автогрейдеры, скреперы и бульдозеры; самолеты и вертолеты; космические аппараты и ракеты; морские и речные судна.

Вид изделий, приведенных на рисунке 1.1, может быть классифицирован по различным признакам. Все изделия промышленного применения, например, по условному давлению можно классифицировать по ГОСТ 356-80 [3]. Согласно этому стандарту условное давление образует следующий ряд: 0,1; 0,16; 0,25; 0,40; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 160; 250 МПа.

Трубопроводную арматуру классифицируют [4] по назначению, давлению, диаметру условного прохода и температуре рабочей среды. По назначению трубопроводная арматура делится на запорную, предохранительную, регулирующую и специальную.

Запорная трубопроводная арматура делится на задвижки (клиновые, параллельные, с эластичным уплотнением затвора и с выдвижным или не выдвижным шпинделем), вентили (проходные, прямоточные, угловые, диафрагмовые, сильфонные и запорно-регулирующие), краны (конические, цилиндрические, шаровые, сильфонные, запорно-регулирующие и из неметаллических материалов), дисковые поворотные затворы (с эластичным уплотнением на диске, с эластичным уплотнением в корпусе, с эластичной рубашкой в корпусе и с металлическим уплотнением).

По давлению рабочей среды трубопроводная арматура делится на арматуру низкого давления ( $P_y$  до 1,0 МПа), среднего давления ( $P_y$  от 1,6 до 6,3 МПа), высокого давления ( $P_y$  от 10 до 100 МПа), сверхвысоких давлений ( $P_y$  >100 МПа), вакуумную арматуру, арматуру из серого чугуна ( $P_y$  от 0,1 до 4,0 МПа), арматуру из бронзы и латуни ( $P_y$  от 0,1 до 25,0 МПа), арматуру из стали ( $P_y$  от 0,1 до 100,0 МПа).

По диаметру условного прохода трубопроводная арматура делится:

- на арматуру малых проходов на  $Д_v \le 40$  мм,

- арматуру средних проходов на Д<sub>v</sub> от 50 до 250 мм и

- арматуру больших проходов на Д<sub>у</sub> > 250 мм.

Паровые задвижки энергетической арматуры помимо обычных сплошных испытаний на герметичность подвергаются на заводах-изготовителях выборочно испытаниям на герметичность паром.

При паровых испытаниях допустимые протечки через запорный орган не должны превышать 0,5 г/мин конденсата на каждый сантиметр периметра уплотнения, рассчитанного по среднему диаметру.

К предохранительной арматуре относятся, в основном, предохранительные клапаны, которые классифицируются [4]:

- по виду нагрузки на золотник (предохранительные клапаны грузового типа с непосредственной нагрузкой на золотник, грузового типа с непрямым нагружением золотника и пружинные предохранительные клапаны); - по высоте подъема золотника (низкоподъемные, среднеподъемные и полноподъемные предохранительные клапаны);

- по связи с окружающей атмосферой (клапаны открытого типа, закрытого неуравновешенного и уравновешенного типа);

- по способу открытия клапана (клапаны прямого действия, клапаны со вспомогательным устройством).

Регулирующие клапаны делятся на двухседельные, односедельные, трехходовые, диафрагмовые, шаровые, клапаны малых расходов, клапаны микрорасходов, а регулирующие заслонки делятся на заслонки с плоским диском и заслонки с профильным диском.

### 1.2 Методы испытаний на герметичность изделий

Классификация методов и способов их реализации при испытаниях на герметичность изделий проведена на основании ГОСТ 24054-80 [5], ГОСТ 9544-93 [6] и других стандартов и литературных источников.

Наименование каждого метода и способа его реализации при испытаниях на герметичность изделий приводится в следующей последовательности: порядковый номер – наименование группы методов – наименование метода – на-именования способа, реализующего этот метод, и краткое описание способа реализации метода.

1 Газовый – радиоактивный – компрессионный. Изделие заполняют под давлением смесью газов, которая содержит радиоактивные изотопы. О негерметичности судят по показаниям индикатора радиоактивного излучения.

2 Газовый – радиоактивный – камерный. Изделие помещают в камеру, заполненную под давлением смесью газов, содержащих радиоактивные изотопы, и выдерживают в течение определенного времени. О негерметичности судят по показаниям индикатора радиоактивного излучения.

3 Газовый – манометрический – компрессионный. Изделие заполняют пробным газом под давлением, прекращают подачу газа и выдерживают в течение определенного времени. О негерметичности судят по значению понижения давления в изделии.

3.1 В изделие и в контрольную емкость подают от источника пробный газ под давлением, а затем отсоединяют контрольную емкость от изделия и измеряют давление в емкости. После заданного промежутка времени подсоединяют изделие к контрольной емкости и берут повторный отсчет по прибору давления. По разности показаний устанавливают степень герметичности изделия [7].

3.2 Изделие заполняют пробным газом, нагружают его давлением в соответствии с сигналами от задатчика давления, регистрируют изменения давления в изделии и расход газа, поступающего в изделие для компенсации утечек, в течение установленного промежутка времени.

Сопоставляют фактические изменения давления и расход газа с заданными изменениями давления и расхода газа и по этим расхождениям значений давлений и расходов судят о герметичности изделия [8]. 3.3 К одной ветви дифманометра подсоединяют изделие, а к другой ветви дифманометра – эталонную емкость. Соединяют вначале параллельно между собой изделие, эталонную емкость, дифманометр и источник пробного газа.

Заполняют всю систему пробным газом до заданного давления, а затем разобщают полости дифманометра и отсоединяют источник пробного газа. Выдерживают изделие и эталонную емкость в течение заданного промежутка времени и берут отсчет по дифманометру. По значению разности давлений в изделии и эталонной емкости делают заключение о герметичности изделия.

4 Газовый – манометрический – вакуумный. Изделие вакуумируют, затем прекращают откачку газа и выдерживают в течение определенного времени. О негерметичности судят по повышению давления в изделии.

5 Газовый – манометрический – камерный. Изделие или его часть помещают в камеру, заполняют его пробным газом под давлением и выдерживают в течение определенного времени. О негерметичности судят по величине повышения давления в камере.

6 Газовый – масс-спектрометрический – вакуумной камеры. Изделие помещают в вакуумированную камеру, подают в него пробный газ или смесь газов под давлением, утечку пробного газа в камеру регистрируют массспектрометрическим течеискателем.

7 Газовый – масс-спектрометрический – накопления при атмосферном давлении. Изделие помещают в чехол или камеру, заполненную атмосферным воздухом, подают в него пробный газ или смесь газов под давлением, выдерживают в течение определенного времени, а затем в камеру вводят щуп, соединенный с масс-спектрометрическим течеискателем. О негерметичности судят по показаниям течеискателя.

8 Газовый – масс-спектрометрический – опрессовки в камере. Изделие вакуумируют, помещают в камеру и соединяют с масс-спектрометрическим течеискателем, в камеру подают пробный газ или смесь газов. О негерметичности судят по показаниям течеискателя.

9 Газовый – масс-спектрометрический – опрессовки замкнутых оболочек. Изделие помещают в камеру, заполненную под давлением пробным газом, выдерживают в течение определенного времени, после чего изделие помещают в другую камеру, которую вакуумируют и соединяют с массспектрометрическим течеискателем. О негерметичности судят по показаниям течеискателя.

10 Газовый – масс-спектрометрический - обдувки. Изделие подключают к масс-спектрометрическому течеискателю и вакуумируют, контролируемые участки обдувают струей пробного газа или смеси газов. О негерметичности судят по показаниям течеискателя.

11 Газовый – масс-спектрометрический – щупа. Изделие заполняют под давлением пробным газом или смесью газов, после чего сканируют контролируемые участки поверхности щупом, соединенным с масс-спектрометрическим течеискателем. О негерметичности судят по показаниям течеискателя.

12 Газовый – галогенный – щупа. Изделие заполняют под давлением галоидосодержащим пробным газом (например, фреоном, четыреххлористым уг-

леродом) или смесью газов, после чего сканируют контролируемые участки поверхности щупом галогенного течеискателя. О негерметичности судят по показаниям течеискателя.

13 Газовый – галогенный – обдува. Преобразователь галогенного течеискателя соединяют с испытываемым изделием, после чего изделие вакуумируют, контролируемые участки обдувают струей галоидосодержащего пробного газа или смеси газов. О негерметичности судят по показаниям течеискателя.

14 Газовый – пузырьковый - компрессионный. Изделие погружают в ванну с индикаторной жидкостью и заполняют его пробным газом под давлением. О негерметичности судят по появлению в жидкости пузырьков газа, выходящего через неплотности изделия.

15 Газовый – пузырьковый – нагреванием. Изделие погружают в ванну с нагретой индикаторной жидкостью и заполняют его пробным газом под давлением. О негерметичности судят по появлению в жидкости пузырьков газа, выходящего через неплотности изделия.

16 Газовый – пузырьковый – камерный. Изделие подключают к пузырьковой камере и подают в него пробный газ под давлением. О негерметичности судят по интенсивности появления пузырьков газа в жидкости пузырьковой камеры после стабилизации системы.

17 Газовый – пузырьковый – вакуумный. Изделие погружают в ванну с индикаторной жидкостью, пространство над которой вакуумируется, и заполняют его пробным газом под давлением. О негерметичности судят по появлению в жидкости пузырьков газа, выходящего через неплотности изделия.

18 Газовый – пузырьковый – обмыливанием. Изделие заполняют пробным газом под давлением, контролируемые участки покрывают пенящейся массой. О негерметичности судят по появлению пузырьков газа в пенящейся массе.

19 Газовый – ультразвуковой. Изделие заполняют пробным газом под давлением, после чего сканируют контролируемые участки щупом ультразвукового течеискателя. О негерметичности судят по уровню сигнала ультразвукового течеискателя.

20 Газовый – катарометрический. Изделие заполняют под давлением пробным газом с теплопроводностью, отличающейся от теплопроводности окружающего воздуха, после чего сканируют контролируемые участки щупом катарометрического течеискателя. О негерметичности судят по показаниям катарометрического течеискателя.

21 Газовый – химический. Контролируемые участки покрывают индикаторной лентой или индикаторной массой, после чего изделие заполняют под давлением пробным газом, химически реагирующим с материалом ленты или массы, и выдерживают изделие в течение определенного времени. О негерметичности судят по появлению пятен на ленте или массе.

22 Газовый – инфракрасный. Изделие заполняют пробным газом под давлением, после чего сканируют контролируемые участки щупом, соединенным с инфракрасным течеискателем, измеряющим интенсивность инфракрасного излучения. О негерметичности судят по показаниям течеискателя.

23 Газовый – параметрический. Изделие помещают в камеру, заполненную пробным газом, создают в камере избыточное давление. О негерметичности судят по отклонению функциональных характеристик изделия от их номинальных значений.

24 Жидкостный – гидростатический – компрессионный. Изделие заполняют пробной жидкостью и выдерживают в течение определенного времени. О негерметичности судят по появлению капель или пятен на поверхности изделия или индикаторной массе, нанесенной на эту поверхность.

25 Жидкостный – гидростатический – внешней опрессовки. Изделие погружают в ванну с пробной жидкостью, создают в ванне избыточное давление и выдерживают изделие в течение определенного времени. О негерметичности судят по появлению капель или пятен на внутренней поверхности изделия.

26 Жидкостный – гидростатический – капиллярный. Контролируемые участки оболочки изделия покрывают индикаторной массой, противоположную сторону оболочки смачивают пробной жидкостью. О негерметичности судят по появлению пятен на индикаторной массе.

27 Жидкостный – люминесцентный (цветной) – компрессионный. Изделие заполняют под давлением пробной жидкостью, содержащей люминесцирующие вещества, и выдерживают в течение определенного времени, после чего освещают контролируемые участки ультрафиолетовым светом. О негерметичности судят по появлению на поверхности изделия светящихся (цветных) точек или линий.

28 Жидкостный – люминесцентный (цветной) – капиллярный. На оболочку изделия наносят слой жидкости, содержащей люминесцирующие (красящие) вещества, или погружают в эту жидкость, выдерживают в течение определенного времени, после чего освещают противоположную сторону оболочки ультрафиолетовым светом. О негерметичности судят по появлению на поверхности светящихся (цветных) точек или линий.

29 Жидкостный – электрический. Изделие заполняют пробной жидкостью под давлением и выдерживают в течение определенного времени. На контролируемый участок устанавливают два электрода, разделенных пластинкой или лентой из непроводящего пористого материала. О негерметичности судят по появлению тока в цепи, соединяющей электроды.

30 Жидкостный – параметрический. Изделие помещают в ванну с пробной жидкостью и выдерживают в течение определенного времени. О негерметичности судят по отклонению функциональных характеристик изделия от их номинальных значений.

### 1.3 Применяемость методов испытаний изделий на герметичность

Литературные источники свидетельствуют о применении на практике различных методов и средств испытаний изделий на герметичность. В то же время отсутствует информация о частоте применения тех или иных методов. Для оценки применимости различных методов использованы данные по предприятиям г. Оренбурга и данные сайтов Интернета по предприятиям, на которых проводятся испытания изделий на герметичность.

Установлено (рисунок 1.2), что свыше 70 % всех изделий испытывают жидкостным гидростатическим, газовыми пузырьковым и манометрическим методами. Время испытаний изделий на герметичность этими методами изменяется от 15 до 180 с и может достигать нескольких часов.



1 - гидростатический; 2<sup>2</sup> – пузыръковый; 3<sup>4</sup> - манометрический; 4 - газовые масс-спектрометрические; 5 - другие методы

Рисунок 1.2 - Применяемость методов испытаний изделий на герметичность

### 1.4 Способы и устройства контроля герметичности изделий

#### 1.4.1 Контроль герметичности изделий по давлению

Контроль герметичности изделий по давлению проводится путем подвода в изделие пробного газа (сжатого воздуха или смеси сжатого воздуха с другими газами) заданного давления от источника, затем изделие отсоединяется от источника пробного газа и берется первый отсчет давления по шкале прибора, подсоединенного к изделию. Изделие выдерживается под установленным давлением в течение заданного промежутка времени, берется второй отсчет по шкале прибора давления и по разности давлений делается заключение о герметичности изделия.

Если изделие герметично и утечка пробного газа из него в атмосферу отсутствует, тогда разность отсчетов по прибору давления равна нулю. Испытание на герметичность по этому способу может осуществляться как при избыточном давлении, так и при вакуумметрическом давлении (разряжении) в изделии. В качестве измерительных приборов давления используются манометры, вакуумметры, тягомеры и напоромеры. В авторском свидетельстве № 365610 СССР [9] предложена установка для контроля герметичности изделий, которая содержит устройство сравнения, задатчик давления и связанную с ним систему измерения давления, выполненную в виде рычажного балансировочного устройства с чувствительным к давлению элементом. С целью увеличения чувствительности установки и повышения надежности ее работы, она снабжена устройством установления равновесия рычага системы измерения давления, выполненным в виде кулачкового механизма и электродвигателя. Сигнал на электродвигатель подается от задатчика давления. Устройство сравнения выполнено в виде воздействующего на рычаг сильфона, полость которого подсоединяется к испытываемой емкости.

При испытаниях изделия на герметичность и наличии в нем микротечей происходит снижение давления в контрольной емкости. Непрерывное снижение давления затрудняет выполнение точного отсчета по измерительному прибору давления. Поэтому в авторском свидетельстве № 485335 СССР [10] предложен способ контроля герметичности изделий, заключающийся в том, что в испытываемое изделие и в контрольную емкость подают от источника пробный газ под давлением, а затем отсоединяют контрольную емкость от изделия и измеряют давление в контрольной емкости. После заданного промежутка времени подсоединяют изделие к контрольной емкости и берут повторный отсчет по прибору давления. По разности показаний устанавливают степень герметичности изделия. Этот способ предусматривает также возможность изменения по заданной программе давления как в контрольной емкости, так и в изделии, и позволяет определять герметичность по изменениям параметров контрольного газа в контрольной емкости.

В авторских свидетельствах № 1012063 СССР [11] и №1173221 СССР [12] предложены устройства для контроля герметичности емкостей, которые содержат чувствительный элемент, передаточное звено, микроманометр и индикатор. Передаточное звено выполнено в виде пневматического усилителя типа сопло-заслонка. Чувствительный элемент выполнен в виде двух сильфонов и штока, установленного во втулке с возможностью перемещения. Заслонка усилителя сопло-заслонка закреплена на торце штока с возможностью регулирования ее положения. Сопло установлено с противоположного конца штока и пневматически взаимодействует с заслонкой. Для подсоединения устройства к источнику сжатого воздуха предусмотрен дистанционно управляемый пневматический клапан.

В авторском свидетельстве № 1201701 СССР [13] предложено устройство для контроля герметичности изделий, которое содержит мембранный измерительный преобразователь. Мембрана преобразователя взаимодействует с соплом и образует усилитель типа сопло-заслонка. В устройство входит командный блок, предназначенный для формирования необходимых значений испытательного давления.

Испытываемое на герметичность изделие в некоторых устройствах, защищенных авторскими свидетельствами, размещают в герметичной камере, заполняют изделие пробным газом при избыточном давлении, выдерживают заданное время при температуре окружающей среды и по изменению давления в герметичной камере до и после выдержки изделия под давлением делают заключение о герметичности.

В авторском свидетельстве № 1245905 СССР [14] предложено устройство для контроля герметичности, в котором изделие помещают в испытательную камеру и создают в ней вакуум. К испытательной камере подключают измеритель давления, соединенный с двумя фотоэлектрическими преобразователями. Сигналы от преобразователей через две линии задержки поступают на логический блок.

Логический блок формирует индикацию «Брак» или «Годен» на основании сигналов, поступающих от первого менее чувствительного фотоэлектрического датчика. В случае появления индикации «Годен» к логическому блоку подключается второй более чувствительный фотоэлектрический датчик, в испытательной камере создается более глубокий вакуум и на основании вакуума устанавливается герметично или негерметично изделие.

В авторском свидетельстве № 724960 СССР [15] предложено устройство для контроля герметичности изделий, отличающееся от устройства, рассмотренного в авторском свидетельстве № 1201701 СССР [13], тем, что содержит испытательную герметичную камеру, в которой размещается изделие, а мембранный преобразователь снабжен второй мембраной. Полость между мембранами преобразователя сообщена со струйным элементом взамен усилителя типа сопло-заслонка.

Регулируемую контрольную течь предлагается использовать в способе контроля изделий на герметичность по авторскому свидетельству № 501322 СССР [16]. Суть этого способа состоит в том, что к испытываемому изделию и дополнительной емкости подсоединяют вакуумный насос, вакуумируют систему до заданного давления, а затем отключают от вакуумного насоса испытываемое изделие, а к дополнительной емкости подсоединяют векости подсоединяют контрольную течь.

Через контрольную течь устанавливают значение потока, обеспечивающего постоянство заданного давления в дополнительной емкости. Если изделие герметично, тогда через контрольную течь будет проходить максимальное количество воздуха из атмосферы в дополнительную емкость, равное производительности работающего вакуум-насоса. Если же изделие негерметично, тогда через его микрощели входит какой-то поток воздуха в изделие. Чтобы поддержать заданное значение разрежения в дополнительной емкости (и изделии, так как они сообщены) необходимо уменьшить приток воздуха в дополнительную емкость через контрольную течь.

По расходу воздуха через регулируемую контрольную течь делают заключение о герметичности изделия. Если в этом способе во время испытаний изделия на герметичность осуществлять отключение вакуум-насоса от изделия и дополнительной емкости, тогда необходимо измерять не только расход воздуха через контрольную течь, но и повышение давления в дополнительной емкости. Эта идея воплощена в авторском свидетельстве № 748158 СССР [17].

Согласно авторскому свидетельству № 748158 СССР [17] устройство для определения суммарных утечек газа из изделия через неплотности содержит

камеру, упругий элемент, датчик перемещения упругого элемента, измерительный блок, задатчик давления, гидравлический интегратор и блок программного управления. Блок программного управления соединен с измерительным блоком, задатчиком давления и с запорными органами. Работа устройства происходит в автоматическом режиме.

Устройство обеспечивает подключение испытываемого изделия к источнику пробного газа, нагружение его давлением в соответствии с сигналами от задатчика давления, а также регистрацию изменения давления в изделии и расхода газа, поступающего в изделие для компенсации утечек, в течение установленного промежутка времени.

Измерять изменение давления, расхода, температуры и плотности рабочей среды предлагается при определении герметичности изделий в соответствии со способом по авторскому свидетельству № 658421 СССР [18]. Для вычисления герметичности по этим величинам применяются специальные формулы.

Рассмотренные в настоящем разделе устройства и способы контроля герметичности изделий имеют недостаточную чувствительность. Связано это с двумя причинами. Во-первых, утечки пробного газа через неплотности и микрощели изделия характеризуются малым расходом, а соответственно и очень малым снижением давления. Во-вторых, чувствительность измерительных приборов давления недостаточная. Она определяется классом точности приборов давления, который, например, для образцовых манометров не превышает 0,5 %. Поэтому более целесообразным при контроле герметичности изделий считается измерение не давления, а разности двух давлений за время испытаний изделия.

### 1.4.2 Контроль герметичности изделий по разности давлений

Широко распространенный способ контроля герметичности изделий по разности давлений с использованием дифференциального манометра (дифманометра) состоит в том, что к одной ветви дифманометра подсоединяют изделие, а к другой ветви дифманометра – эталонную емкость. С помощью запорной арматуры соединяют вначале параллельно между собой изделие, эталонную емкость, дифманометр и источник эталонного газа. Заполняют всю систему пробным газом до заданного давления, а затем разобщают полости дифманометра и отсоединяют источник пробного газа. Выдерживают изделие и эталонную емкость в течение заданного промежутка времени и берут отсчет по дифманометру. По значению разности (перепада) давлений в изделии и эталонной емкости делают заключение о герметичности изделия.

Этот способ имеет существенно большую чувствительность по сравнению с испытаниями изделий на герметичность по давлению потому, что дифманометр реагирует и измеряет не статическое давление, а разность двух давлений. Например, если изделие испытывается при статическом давлении, равном 0,15 МПа, тогда необходимо выбрать манометр с пределами измерения от 0 до 0,25 МПа. Для измерения перепада давлений при испытаниях изделия на герметичность при статическом давлении 0,15 МПа можно использовать дифманометры с перепадом давлений, например, 100-400 Па.

В процессе контроля герметичности изделий с использованием дифманометра и эталонной емкости возможны изменения температуры окружающей среды, которая воздействует на стенки эталонной емкости и изделия. Давление пробного газа в эталонной емкости и изделии в результате изменения температуры окружающей среды также изменяется и вносятся дополнительные погрешности.

Поэтому в авторском свидетельстве № 1027560 СССР [19] предложено устройство для контроля герметичности изделий, которое содержит эталонную емкость, источник контрольного газа, магистрали с запорной арматурой, дифманометр, одна ветвь которого соединена с эталонной емкостью, и термостатированный кожух. Термостатированный кожух охватывает с зазором эталонную емкость. Изделие сообщено с зазором между термостатированным кожухом и эталонной емкостью и с другой ветвью дифманометра.

Другим вариантом, позволяющим уменьшить погрешности, связанные с изменением давления и температуры контрольного газа в эталонной емкости, является размещение контролируемого изделия в эталонной емкости. Этот способ используется в устройствах по авторскому свидетельству № 800759 СССР [20].

Устройства, используемые для контроля герметичности изделий с помощью дифманометров, часто снабжаются различными электрическими, электронными или пневматическими усилителями типа сопло-заслонка, струйная трубка или усилителями с использованием элементов струйной техники. В устройстве для испытаний изделий на герметичность по авторскому свидетельству № 781648 СССР [21] содержится эталонная емкость, соединительные магистрали с запорными органами, дифманометр и обратный клапан. Дифманометр выполнен в виде пневмопреобразователя, который совместно с обратным клапаном составляют достаточно мощный усилитель разности давлений. По этой разности давления, возникающей между изделием и эталонной емкостью, делают заключение о герметичности изделия.

В авторском свидетельстве № 815545 СССР [22] предложено устройство контроля герметичности изделий, содержащее усилитель типа сопло-заслонка, магистрали со стабилизированным давлением с запорным клапаном для подачи пробного газа в изделие, одномембранный блок, управляющая полость которого сообщена с испытываемым изделием, дифманометр и две пары дросселей. Сопло усилителя взаимодействует с мембраной одномембранного блока со стороны его измерительной полости.

Пневматический усилитель типа струйная трубка использован в устройстве по авторскому свидетельству № 737803 СССР [23]. Устройство содержит эталонную емкость, дифманометр с вялой мембраной, одна полость которого сообщена с эталонной емкостью, и вторичный прибор для регистрации разности давлений, измеряемой дифманометром. Распределитель потока воздуха (основная часть пневматического усилителя) выполнен в виде сопла, один вход которого соединен с источником сжатого воздуха (он же используется в качестве пробного газа) через стабилизатор давления, второй вход (вход управления распределителя) сообщен с эталонной емкостью, а выход соединен с другой полостью дифманометра. Со второй полостью дифманометра соединена также эталонная емкость.

Таким образом, изменение давления в эталонной емкости, возникающее при испытаниях изделия на герметичность, усиливается с помощью пневматического усилителя по давлению, а затем разность этого давления и давления в изделии воспринимается дифманометром и регистрируется вторичным прибором. По этой разности давлений делают заключение о герметичности изделия.

Устройство по авторскому свидетельству № 896444 СССР [24] содержит источник избыточного давления, измерительный блок с мембраной, емкостный датчик перемещения мембраны, включенный в электрическую цепь генератора переменного напряжения, и индуктивный датчик перемещения мембраны.

Индуктивный и емкостный датчики установлены с двух сторон мембраны. Емкостный и индуктивный датчик составляют в этом случае колебательный контур, настраиваемый на резонансную частоту. Смещение мембраны измерительного блока приводит к одновременному, например, увеличению емкости, снимаемой с емкостного датчика, и уменьшению индуктивности от индуктивного датчика. Взаимодействие таких изменяющихся сигналов приводит к существенному увеличению чувствительности устройства к измеряемой разности давлений при испытаниях на герметичность изделий.

В авторском свидетельстве № 800759 СССР [25] предложено устройство контроля герметичности изделий, содержащее эталонную емкость для размещения в ней испытываемого изделия, систему подачи газа в эталонную емкость и испытываемое изделие, измеритель перепада давления, одна полость которого соединяется с изделием, а другая сообщена с эталонной емкостью, и преобразователь давления.

Преобразователь давления подключен к магистрали между эталонной емкостью и измерителем перепада давлений. Отличие этого устройства от известных состоит в том, что испытываемое изделие помещается внутри эталонной емкости и заполняется пробным газом до заданного давления. Таким образом, уменьшается взаимовлияние изменения давления и температуры в изделии и эталонной емкости.

Преобразователь давления в этом устройстве представляет собой умножитель давления. Авторами изобретения ставилась цель увеличения выходного значения давления при испытаниях на герметичность изделий. Однако, повидимому, установленный умножитель давления в устройстве заметной пользы не приносит. Введение умножителя в устройство потребует столько же кратного уменьшения (как и предполагаемое увеличение выходного давления) давления контрольного газа в эталонной емкости, а это в конечном итоге компенсирует положительное влияние умножителя давления.

В авторском свидетельстве № 518668 СССР [26] рассматривается устройство контроля герметичности изделий, содержащее эталонную емкость, источник контрольной среды, дифманометр, одна полость которого соединена с изделием, а другая – с эталонной емкостью, и трубопроводы с запорными ор-

ганами. Отсчетная трубка дифманометра выполнена в виде капилляра, эталонная емкость выполнена с регулируемым объемом. Устройство снабжено контрольной течью, подключенной к трубопроводу, соединяющему полость изделия с дифманометром.

Капилляр, установленный в этом устройстве, позволяет увеличить перемещение жидкостного поршня. Увеличение перемещения жидкостного поршня осуществляется за счет «изменения соотношения между суммарной капиллярной силой и массой поджимаемой жидкости» [26]. Регулируемая емкость, используемая в качестве эталонной емкости, применена для «установления соизмеримых объемов эталонной емкости и изделий, имеющие различные типы, геометрические размеры и объемы» [26].

Назначение контрольной течи может быть различным. В этом устройстве контрольная течь используется как течь, шунтирующая утечки из изделия. Основное ее назначение состоит в увеличении перепада давлений за время испытаний изделия и получения большего значения отсчета по капилляру дифманометра. Но это увеличение перепада давления, по-видимому, не увеличивает ни чувствительности, ни точности измерения герметичности изделия, за исключением незначительного уменьшения инструментальной погрешности дифманометра.

Использование дифманометра с жидкостным поршнем и расходомера предложено в способе по авторскому свидетельству № 934266 СССР [27]. Согласно этому способу, вначале испытательное давление контрольного газа от источника подается в обе полости дифманометра. После этого отсоединяют источник контрольного газа от дифманометра, разобщают обе полости дифманометра и в полости, подсоединенной к изделию (а изделие до этого момента времени еще не наполнено пробным газом), понижают давление до контрольного значения и фиксируют реперное положение жидкостного поршня.

Этими операциями осуществляется настройка устройства в исходное начальное положение и проверка работоспособности дифманометра. В дальнейшем заполняют изделие контрольным газом заданного давления и выдерживают емкость под давлением в течение установленного времени. Обе полости дифманометра при этом находятся под давлением и в результате утечек газа из изделия происходит перемещение жидкостного поршня дифманометра. Жидкостный поршень не должен доходить до реперной точки за время испытаний изделия. После истечения заданного промежутка времени испытаний снижают давление в изделии, выпуская часть пробного газа через расходомер до тех пор, пока жидкостный поршень не установится напротив реперной точки. По измеренному количеству определяют (вычисляют как недостающую часть до контрольного объема) суммарную утечку через микрощели изделия.

В авторском свидетельстве № 1165906 СССР [28] предложено устройство контроля герметичности изделий, содержащее систему подачи рабочей среды, эталонную емкость переменного объема с приводным приспособлением, дифманометр, одна полость которого соединена с эталонной емкостью, а другая предназначена для сообщения с изделием, расходомер, блок управления и две дополнительных емкости равных объемов. Расходомер соединен с эталонной емкостью через регулируемый вентиль. Блок управления подключен к дифманометру, регулируемому вентилю и эталонной емкости (к ее приводу). Две дополнительные емкости соединены с системой подачи рабочей среды, одна из них соединена также с полостью дифманометра со стороны эталонной емкости, а другая - с полостью дифманометра, предназначенной для соединения с испытываемым изделием.

Принцип действия этого устройства состоит в заполнении системы контрольной средой, отключении источника среды от системы и выдержке в течение установленного времени при испытаниях на герметичность изделия. За это время стрелка дифманометра отклоняется на какое-то деление. После этого с помощью блока управления открывается клапан на расходомер и контрольная среда из эталонной емкости уходит в сливную магистраль до тех пор, пока стрелка дифманометра возвратится в исходное (нулевое) положение. По величине расхода контрольной среды через расходомер делают заключение о герметичности изделия.

Предложенный в авторском свидетельстве № 1177707 СССР [29] способ контроля герметичности изделий заключается в том, что к источнику испытательного давления подключают изделие и входную полость дифманометра, а выходную полость дифманометра вначале сообщают с входной полостью и изделием.

После выравнивания давления в полостях дифманометра и изделии разобщают полости дифманометра, а изделие отключают от источника испытательного давления и выдерживают в течение заданного времени испытания изделия на герметичность. После этого входную полость дифманометра отключают от источника испытательного давления, а выходную полость от изделия. Соединяют выходную полость дифманометра с емкостью контрольного давления и снижают показания динамометра.

Отличительной особенностью этого способа является то, что настройка или коррекция дифманометров осуществляется не на нулевом перепаде давления, а на каком-то заданном контрольном перепаде давления. Однако, в этом способе имеется неудобство, связанное с тем, что разность отсчетов, которая берется по дифманометру, имеет обратную пропорциональность по отношению к значению утечек пробного газа из изделия при испытаниях на герметичность.

В авторских свидетельствах №761867 СССР [30], № 890094 СССР [31] и № 934266 СССР [32] предложено, а затем усовершенствовано устройство контроля герметичности изделий по разности давлений и по расходу подобно тому, как в рассмотренном выше способе испытаний на герметичность по авторскому свидетельству № 934266 СССР [27].

В авторском свидетельстве № 1191786 СССР [33] предложено устройство контроля герметичности изделий, которое содержит датчик абсолютного давления, задатчик перепада давлений, изделие, датчик температуры, устанавливаемый в испытываемом изделии, блок преобразования, коммутатор, вычислительный блок, дифманометр, эталонную емкость и блок автоматического выбора времени измерения. Вход блока автоматического выбора времени измерения соединен с выходом вычислительного блока, а выход блока автоматического выбора времени измерения соединен со входами коммутатора, блока преобразования сигналов от датчика температуры в унифицированный сигнал, блока задатчика перепада давления и динамометра.

Таким образом, устройство позволяет в автоматическом режиме устанавливать перепад давления, до которого необходимо вести испытание изделия на герметичность, и время испытаний изделия. Герметичность изделия определяют по разности давления между изделием и эталонной емкостью, по давлению и температуре пробного газа в изделии в процессе испытаний. Расширение возможностей этого устройства приводится в авторском свидетельстве № 658421 СССР [34].

По инверсной разности давлений между изделием и эталонной емкостью, измеренной дифманометром, делают заключение о герметичности изделия при использовании устройства по авторскому свидетельству №641295 СССР [35]. Устройство содержит эталонную емкость, источник контрольного газа с магистралями, дифманометр, включенный в измерительную магистраль эталонной емкости и индикаторный манометр.

Эталонная емкость выполнена в этом устройстве с жиклёром, площадь поперечного сечения которого  $F_{3m} = F_{ucn} \cdot V_{3m} / V_{ucn}$ , где  $F_{ucn}$  - суммарная допускаемая площадь сечения отверстий, м<sup>2</sup>, через которые возможны утечки газа из испытываемого изделия;  $V_{3m}$  - объем эталонной емкости, м<sup>3</sup>;  $V_{ucn}$  - объем изделия, м<sup>3</sup>.

Это устройство работает таким образом, что при полностью герметичном изделии дифманометр показывает наибольший перепад давлений. Это особенно ценно при массовых испытаниях на герметичность изделий, основная часть из которых герметична. Если изделие герметично, тогда из него пробный газ не выходит и давление остается равным заданному, а из эталонной емкости выходит контрольный газ через жиклер и давление в ней снижается. Дифманометр показывает эту разность давления при контроле герметичности изделия.

# 1.4.3 Контроль герметичности при равенстве давлений в испытываемом изделии и эталонной емкости

Рассмотренные в предыдущем разделе авторские свидетельства и патенты относятся к устройствам и способам, в которых при контроле герметичности изделий создается разность давлений пробного газа в изделии и эталонной емкости. Эта разность давлений измеряется дифманометром и по разности давлений делаются выводы о герметичности изделия.

Метод контроля герметичности изделий по перепаду давлений пробного газа в испытываемом изделии и эталонной емкостью имеет недостаточную чувствительность по отношению к значениям утечек газа из изделия. Допустим, что испытывается на герметичность изделие объемом  $V_1 = 0,5$  м<sup>3</sup>, при контрольном давлении  $P_1 = 0,15$  МПа, а утечки при испытании изделия на герметичность составляют 10 см<sup>3</sup> =  $10 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup> за время испытаний, то есть конечный объем газа в изделии  $V_2 = (0,5 - 10 \cdot 10^{-6}) \text{ м}^3$ . На основании закона Бойля – Мариотта:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

где  $P_1$ ,  $V_1$  и  $P_2$ ,  $V_2$  - соответственно давление, Па, и объем пробного газа, м<sup>3</sup>, в испытываемом изделии до начала выдержки и после окончания выдержки изделия под давлением.

Из этого выражения следует, что  $P_2 = 0,15 \cdot 0,5/(0,5-10 \cdot 10^{-6}) = 0,15000$  МПа. Разность давлений, измеряемая дифманометром,  $\Delta P = P_2 - P_1 = 0,150003 - 0,15 = 0,000003$  МПа = 3 Па.

Измерить с достаточной точностью перепад давлений 3 Па и сделать заключение о герметичности испытываемого изделия на основании этого перепада давления фактически невозможно. Изменение объема пробного газа в испытываемом изделии на 10 см<sup>3</sup> (как было принято выше) при давлении 0,15 МПа (то есть, при постоянном давлении) возможно измерить с существенно большей точностью нежели перепад давлений, равный 3 Па. На основании этого предложен целый ряд устройств и способов, использующих эффект изменения объема между испытываемым изделием и эталонной емкостью или непосредственно измеряющих объем с помощью расходомеров различных конструктивных типов.

В авторских свидетельствах № 641295 и 641294 СССР [35] и [36] предложено устройство для контроля утечек пробного газа из испытываемого на герметичность изделия. Устройство содержит эталонную емкость, систему подачи сжатого контрольного газа, расходомер и золотниковый блок с двумя полостями сравнения, разделенными двумя связанными между собой поршнями.

Полости между поршнями и корпусом соединены соответственно с испытываемым изделием и эталонной емкостью. Между собой поршни образуют рабочую полость, которая периодически (в зависимости от утечек пробного газа из изделия) сообщается с системой подачи контрольного газа и расходомером. Расходомер подсоединен к золотнику и изделию.

Заполнение всех элементов устройства осуществляется от источника контрольного газа через отдельные от золотника магистрали. После заполнения изделия и контрольной емкости газом и при наличии утечек из изделия, давление газа в изделии немного снижается. В результате этого снижается также давление в полости между поршнем и корпусом золотника со стороны испытываемого изделия.

Оба соединенные между собой поршни золотника смещаются и подводят пробный газ от источника в изделие. Давление газа в изделии повышается, достигает давления газа в контрольной емкости и поршни золотника прекращают поступление газа в изделие. По показаниям расходомера газа делают выводы о герметичности изделия.

Устройство контроля герметичности изделий по авторскому свидетельству № 645045 СССР [37] содержит эталонную емкость, индикатор потока испытательной среды, расходомер, регистрирующий прибор, электропневматический клапан для сообщения эталонной емкости с полостью испытываемого изделия и калибровочную емкость заданного объема, соединенную с эталонной емкостью через индикатор потока среды и контрольной течью, подключенной к калибровочной емкости.

Калибровочная емкость предназначена для проверки (калибровки) работы расходомера с регистрирующим прибором перед каждым испытанием или перед серией испытаний однотипных изделий. В этом случае пользуются регулируемой калибровочной течью. При испытании изделия на герметичность, после заполнения всей системы испытательной средой заданного давления и выдержки в течение установленного интервала времени, подключают изделие к эталонной емкости через индикатор потока.

Часть испытательной среды из эталонной емкости переходит в изделие до выравнивания в них давления. Этот поток испытательной среды измеряют с помощью расходомера и регистрирующего прибора и делают вывод о негерметичности изделия.

Наиболее распространенными элементами индикации перемещения объемов контрольного газа из эталонной емкости в испытываемое на герметичность изделие при равенстве в них давления являются трубки с жидкостным поршнем и барботеры (пузырьковые камеры). Трубки в этих индикаторах выполняются из металла, а чаще всего из стекла и имеют различный внутренний диаметр (вплоть до капиллярных) и различную толщину в зависимости от давления, при котором испытывают на герметичность изделия.

Трубки с жидкостным поршнем располагаются обычно горизонтально, жидкостный поршень перемещается вдоль горизонтальной оси и не создает при перемещении на различных участках трубки разности давлении за счет своей массы. В этом состоит главное отличие измерительных трубок от жидкостных микроманометров и дифманометров, в которых часть жидкости поднимается на высоту, уравновешивающую измеряемое давление или разность давлений. Естественно, что для страгивания поршня в измерительной трубке необходима какая-то разность давлений.

Разность давлений, действующая на жидкостный поршень, зависит от капиллярных сил, возникающих между жидкостью поршня и стенками трубки. Эта разность давлений и сила страгивания жидкостного поршня не зависят от места расположения поршня вдоль измерительной трубки.

В авторском свидетельстве № 954831 СССР [38] предложено устройство контроля герметичности изделий, которое содержит эталонную емкость, источник контрольного газа, трубопроводы с запорными органами, предназначенные для соединения полости изделия и эталонной емкости между собой и с источником контрольной среды, измерительную трубку и индикатор. Измерительная трубка выполнена из металла с изолированными включающими и выключающими контактами, установленными внутри трубки.

Вначале испытаний на герметичность подключают к источнику пробного газа изделие, эталонную емкость и измерительную трубку параллельно и заполняют пробным газом заданного давления. В этом состоянии токопроводящая жидкость в измерительной трубке должна занимать исходное положение напротив нулевого деления на трубке. После этого отключают источник пробного газа от устройства и переключают на последовательное соединение между собой эталонную емкость, измерительную трубку и изделие.

При наличии в изделии микрощелей часть пробного газа выходит за время выдержки устройства под давлением из изделия в атмосферу. Для выравнивания давления в эталонной емкости и изделии часть пробного газа по измерительной трубке из эталонной емкости переходит в изделие. Поток пробного газа вызывает смещение жидкостного поршня в измерительной трубке. По смещению жидкостного поршня в измерительной трубке делают заключение о герметичности изделия.

В авторском свидетельстве № 1232975 СССР [39] представлено усовершенствованное устройство контроля герметичности изделий с использованием прозрачного сосуда, частично заполненного жидкостью с опущенной в жидкость трубкой (пузырьковой камерой), источника света и фотоприемника. Пузырьковая камера установлена между источником света и фотоприемником.

Источник света выполнен в виде генератора импульсов света модулированной частоты, а с фотоприемником последовательно соединены резонансный усилитель, детектор с усредняющим фильтром и счетчик импульсов. Резонансный усилитель усиливает только модулированный сигнал, поступающий от генератора импульсов света. Устройство позволяет исключить влияние ложных сигналов и более эффективно вести подсчет пузырьков воздуха, проходящих через пузырьковую камеру при испытаниях на герметичность изделий.

В авторском свидетельстве № 1226098 СССР [40] в устройстве контроля герметичности изделий с использованием пузырьковой камеры предлагается источник света и фотоприемник для учета воздушных пузырьков располагать так, чтобы оптическая ось источника света и фотоприемника проходила выше среза трубки пузырьковой камеры на некоторое значение. Эта значение смещения должно обеспечивать учет пузырьков только после отрыва их от среза трубки. В этом случае повышается точность учета пузырьков воздуха, проходящих через жидкость пузырьковой камеры, при испытаниях на герметичность изделия.

Устройство для измерения малых расходов газа при контроле герметичности изделий предложено в авторском свидетельстве №697854 СССР [41]. Устройство, содержащее сосуд с электропроводящей жидкостью, размещенную в нем газопроводящую трубку, два электрода и поплавок с глухим отверстием, в котором размещена газопроводящая трубка.

В боковой стенке поплавка выполнен пузырькообразующий канал. Один из электродов расположен на поплавке напротив пузырькообразующего канала, а другой электрод закреплен на корпусе сосуда. Электроды предназначены для вывода сигналов на счетчик импульсов. Между электродами в исходном состоянии проходит электрический ток, а при формировании пузырька воздуха и до отрыва его от среза пузырькообразующего канала электрическая цепь разрывается.

Устройство контроля герметичности изделий по авторскому свидетельству №1155389 СССР [42], содержащее емкость с жидкостью и размещенную в емкости трубку с входным отверстием и выходным отверстием для пузырьков контрольного газа, отличается от известных тем, что выходное отверстие выполнено в стенке трубки в виде щели, параллельной оси трубки. Кроме этого, устройство снабжено дросселем, установленным в трубке между входным её отверстием и щелью.

Дроссель установлен для того, чтобы ограничить поток контрольного газа при испытании изделия тем значением, при котором выходящий газ формирует пузырьки, а не выходит сплошным потоком из щели.

# 1.4.4 Контроль герметичности изделий по визуально наблюдаемым цветным газообразным средам

Для определения местоположения утечки горючего газа из трубопровода добавляют к нему индикаторное вещество. В качестве индикаторного вещества используют различные газообразные вещества или твердое мелкодисперсное вещество, переносимое газом. Индикаторное вещество при выходе в атмосферу в результате реакции с атмосферным воздухом или с влагой делает газ видимым.

Чаще всего в качестве индикаторного вещества, добавляемого к горючему газу, используется находящееся в нормальном состоянии в виде летучей жидкости соединение гидрата кремния или гидробора.

Гидроборированием [43] является присоединение борана BH<sub>3</sub> или его производных к ненасыщенным соединениям. Осуществляется оно при температурах от минус 25 до плюс 20 <sup>0</sup>С в присутствии катализатора (диэтилового эфира, тетрагидрофурана). Дымовые составы [43] разработаны в основном для снаряжения дымовых шашек. Различают составы для создания дымовых завес (белые маскирующие дымы) и цветные дымовые сигнальные составы. Белые маскирующие дымы содержат легко возгоняющееся при высокой температуре твердое вещество (аммоний хлористый  $NH_4Cl$ , нафталин, антрацен) и термическую смесь для его возгонки, состоящую из окислителя (чаще всего  $KClO_3$ ) и горючего вещества (например, угля).

Используются также составы на основе цинка и гексахлорэтана, при взаимодействия которых образуется белый дым, состоящий из мелких частичек ZnCl. Дополнительным окислителем в таких составах часто служит  $KClO_3$  или  $NaClO_3$ . В качестве окрашивающих компонентов дымовых сигнальных составов используются органические красители, например, родалин, аурамин.

Способ испытаний на герметичность изделий по авторскому свидетельству № 807098 СССР [44] заключается в том, что в качестве пробного газа используют смесь воздуха с озоном, камеру заполняют этиленом и по свечению, возникающему в результате химической реакции озона с этиленом, делают заключение о герметичности изделия.

Этилен  $H_2C = CH_2$  [43] производят путем пиролиза жидких дистилляторов нефти или низших парафиновых углеводородов (этана, пропана, бутана). Концентрационные пределы взрываемости (КПВ) составляет 3 – 34 % с содержанием кислорода  $O_2$  в смеси 2,9 – 80 %.

При окислении этилена получают окись этилена. Окисление этилена обычно проводят кислородом или воздухом в присутствии катализатора серебра с добавками бария, кальция или кадмия [43].

Озон  $O_3$  [43] является аллотропической модификацией кислорода и имеет синий цвет и резкий запах. Концентрационные пределы взрываемости в смеси с кислородом  $O_2$  составляют 20 – 40 %. Озон легко разлагается на O и  $O_2$  и является сильным окислителем. Получают озон при действии электрического разряда или ультрафиолетового излучения на воздух.

Озон раздражает глаза и дыхательные пути и является сильным бактерицидным средством. Предельно допустимая концентрация озона в воздухе составляет 1 мг/м<sup>3</sup>. Озон интенсивно снижает стойкость резиновых уплотнений. Для повышения озоностойкости резины в их состав вводят антиозонанты или покрывают поверхности износостойкими материалами [43]. Из этих данных видно, что практическое использование в условиях производства способа испытаний на герметичность изделий по авторскому свидетельству № 807098 СССР [44] является весьма проблематичным как из-за сложности получения компонентов и обслуживания установок, так и из-за введения дополнительных мероприятий по технике безопасности и охране труда испытателей.

### 1.4.5 Контроль герметичности изделий газоанализаторами химического состава газов

Известные способы и устройства контроля герметичности изделий с использованием газоанализаторов можно разделить на три группы. К первой группе относятся способы и устройства, при которых испытываемое изделие заполняется пробным газом под избыточным или вакуумметрическим давлением, осуществляется непрерывная принудительная циркуляция пробного газа из изделия в камеры измерительных преобразователей газоанализатора, непрерывно определяется содержание основных компонентов пробного газа и по изменению содержания компонентов пробного газа в результате утечек через микрощели делают выводы о герметичности изделия.

Ко второй группе способов и устройств испытаний на герметичность изделий с помощью газоанализаторов относятся такие, согласно которым изделие заполняется пробным газом под избыточным давлением, помещается в герметичную камеру, осуществляется измерение содержания пробного газа или его компонентов в газообразной среде герметичной камеры и по изменению содержания пробного газа в герметичной камере делают заключение о герметичности изделия.

К третьей группе способов и устройств испытаний на герметичность изделий с использованием газоанализаторов относятся способы и устройства, аналогичные второй группе, но отличающиеся тем, что контрольный газ подается в герметичную камеру, а анализируется его содержание и изменение в испытываемом на герметичность изделии.

Основные характеристики выпускаемых отечественной промышленностью газоанализаторов для измерения и контроля химического состава газов приводятся в работе [45].

Магнитные газоанализаторы на  $O_2$  используют парамагнитные свойства кислорода, который имеет наибольшую магнитную восприимчивость по сравнению с другими газами. Магнитные газоанализаторы типа ГГМК-16 имеют пределы измерения объемных долей (0 - 1) % с погрешностью ±4 %. Время запаздывания составляет от 10 до 20 с.

Принцип действия термокондуктометрических газоанализаторов на  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ , He, Ar,  $NH_3$ . основан на измерении теплопроводности газовой смеси, которая практически однозначно определяется содержанием в ней анализируемого компонента. Термокондуктометрические газоанализаторы типа ТП имеет нижние пределы измерения объемных долей для  $H_2 - (0 - 1)$ %,  $CO_2 - (0 - 10)$ %,  $CH_4 - (0 - 100)$ %. Запаздывание показаний этих газоанализаторов составляет около 4 мин.

В оптико-абсорбционных в инфракрасной области спектра газоанализаторах \_на CO,  $CO_2$ ,  $CH_4$  и  $C_2H_2$  используется способность определяемого газа поглощать инфракрасные лучи в свойственных ему участках спектра. Наименьшие пределы измерения газоанализаторов типа ГОА-4 не превышают (0 - 1) % объемных долей. Время переходного процесса составляет 10 с.

Хемилюминесцентные газоанализаторы на  $O, O_3$  и окислы азота основаны на люминесценции, возникающей при химической реакции, например,  $O_3$  и этилена. Известные газоанализаторы типа 645ХЛ-01 и ГХЛ-201 имеют соответственно время запаздывания 3 мин и 60 с.

Интерференционный газоанализатор типа ГНК-1М на  $H_2$ ,  $CO_2$  и  $CH_4$  измеряет разность показателей преломления света между исследуемой газовой смесью и чистым атмосферным воздухом. Пределы измерения ГНК-1М на  $CH_4$  составляет 0 - 3 мг/м<sup>3</sup>, а время запаздывания 60 с.

Из рассмотренных типов выпускаемых промышленностью газоанализаторов видно, что все они имеют время переходного процесса, которое изменяется от 10 с до 3 мин. Такое время переходного процесса затрудняет использование газоанализаторов для испытаний на герметичность, а особенно для поиска течи при испытаниях на герметичность изделий, когда необходимо зондировать большую поверхность.

### 1.4.6 Контроль герметичности изделий при погружении в жидкость

Испытания многих полых изделий проводятся путем подвода внутрь изделия сжатого воздуха заданного давления, погружения этого изделия в воду и по интенсивности выхода пузырьков сжатого воздуха через неплотности делают заключение о герметичности изделия.

Например, испытания автотракторных теплообменников проводятся в соответствии с общими положениями ГОСТ 24054 [5] и заводскими техническими условиями на испытания теплообменников. На заводах по производству теплообменников испытания на герметичность осуществляется путем погружения в воду.

На Волжском автомобильном заводе используется непрерывный способ проверки теплообменников на герметичность. После мойки и сушки теплообменников по специальной технологии они по конвейеру поступают в ванну, на-

полненную водой, со стеклянными стенками. Заглушаются отверстия теплообменников и подводится воздух под давлением перед входом их в ванну.

Вся система трубопроводов, подводящих сжатый воздух к теплообменникам, движется одновременно с ними. На выходе из ванны от теплообменников отсоединяются трубопроводы со сжатым воздухом, которые затем поступают на пост входа теплообменников в ванну. Испытания на герметичность осуществляет оператор визуально по движению пузырьков воздуха. Пульт управления оператора имеет кнопки, при помощи которых оператор фиксирует бракованные теплообменники, вид и место течи. На пульте установлены счетчики для учета общего числа годных теплообменники и бракованных по каждому виду дефекта.

На заводах фирмы «Ford Motor Co» испытания автотракторных теплообменников на герметичность проводятся путем погружения в воду на установке, которая содержит конвейер, бак с водой и подсветкой, платформы, зажимы и трубопроводы для подвода сжатого воздуха.

Давление сжатого воздуха составляет (0,15 - 0,20) МПа. Температура воды в баке может изменяться от 20 до 50  $^{0}$ С. Длительность испытаний одного теплообменника составляет 60 с.

На предприятиях ПО «Радиатор» испытания на герметичность теплообменников (радиаторов) и сердцевин теплообменников осуществляется в соответствии с следующими требованиями:

- сердцевины теплообменников и теплообменники в сборе должны быть герметичными при давлениях от 0,10 до 0,15 МПа;

- сердцевины теплообменников и теплообменники в сборе должны быть испытаны на герметичность сжатым воздухом под давлением от 0,10 до 0,15 МПа в водяной ванне. Продолжительность испытаний 0,5 мин.

К основным недостаткам испытаний сердцевин теплообменников и теплообменников на герметичность в соответствии с установившейся на заводах изготовителях технологией относятся:

- недостаточная точность учета и неудобство наблюдения за пузырьками воздуха, выходящими из жидкости резервуара, в которую погружается теплообменник при испытаниях на герметичность;

- недостаточный порог чувствительности способа испытаний теплообменников на герметичность из-за погружения их в воду, что приводит к значительному количеству рекламаций потому, что не выявляются мелкие микротечи.

1.4.7 Течеискатели, используемые при испытаниях изделий на герметичность

### 1.4.7.1 Газоструйные течеискатели

В авторском свидетельстве № 872993 СССР [46] предложена схема бесконтактного щупа течеискателя для испытаний на герметичность изделий. Щуп течеискателя состоит из цилиндрического корпуса с кольцевой полостью и каналов для подвода защитного газа и отвода смеси пробного и защитного газов. Канал подвода защитного газа расположен на оси корпуса. Кольцевая поверхность корпуса со стороны индикации имеет днище, которое выполнено из пористого материала. Напротив выхода защитного газа из осевого канала со стороны зоны индикации установлен отражатель струи защитного газа.

Бесконтактный щуп течеискателя (рисунок 1.3) состоит из корпуса 1, кольцевой полости 2, входного 3 и выходного 4 каналов, пористого днища 5, закрывающего кольцевую полость 2 со стороны индикации (зоны), отражателя 6, расположенного против выхода входного канала 3, ребер 9 и испытываемого изделия 10.

Отражатель 6 может перемещаться относительно корпуса 1 по резьбе для точной регулировки зазора между ними. Вентили 7 и 8 предназначены для регулирования подачи защитного газа и скорости отвода рабочей смеси на устройство, анализирующее состав смеси.



Рисунок 1.3 – Схема бесконтактного щупа течеискателя по авторскому свидетельству № 872998 СССР [46]

Бесконтактный щуп течеискателя другой модификации предложен в авторском свидетельстве № 1295246 СССР [47], который содержит корпус с рабочей поверхностью и соосным каналом входного сопла питания и каналом для отвода газа. С целью повышения чувствительности в рабочей поверхности корпуса выполнен паз, а выходное сопло питания и вход канала отвода газа расположены на противоположных сторонах паза соосно друг другу.

Щуп (рисунок 1.4) состоит из корпуса 1 с рабочей поверхностью 2, канала 3, входного сопла 4 питания и канала 5 для отвода воздуха. В рабочей поверхности выполнен паз 6 для турбулизации ламинарной струи воздуха из канала 3. Канал 7 служит для отвода воздухе от сопла 4 питания. На рисунке 1.4 приведена также неплотность 8 сварного соединения 9.



Рисунок 1.4 – Схема бесконтактного щупа течеискателя по авторскому свидетельству № 1295246 СССР [47]

В авторском свидетельстве № 1052904 СССР [48] предложен бесконтактный щуп к течеискателю, который содержит корпус, имеющий рабочий кольцевой выступ с центральным каналом для отвода пробного газа, и кольцевой канал для подвода защитного газа, образованный прямыми конусными поверхностями, впадины которых обращены внутрь конуса.

С целью повышения надежности и упрощения конструкции выступ выполнен в виде обратного конуса. Поверхность конуса сопряжена с внутренней прямой конусной поверхностью канала посредством криволинейной выпуклой поверхности вращения. Щуп (рисунок 1.5) содержит цилиндрический корпус 1, кольцевой канал 2 для подвода защитного газа, прямые конусные поверхности 4 и 5, рабочий кольцевой выступ 6 и центральное отверстие 7.

Поверхность 8 плавно сопряжёна с внутренней прямой поверхностью 5 посредством криволинейной выпуклой поверхности 9 так, что выступ 6 имеет обтекаемую форму. Центральный канал 7 соединен с течеискателем 10, а кольцевой канал 2 - с системой подачи защитного газа 11. Щуп располагается возле поверхности испытываемого на герметичность изделия 3.

В авторском свидетельстве № 560151 СССР [49] предложен бесконтактный щуп течеискателя, который снабжен дополнительным кольцевым соплом с каналом для отвода части пробы воздуха байпасно датчику течеискателя, диафрагмой с регулируемой апертурой и шкалой - указателем величины апертуры. При этом дополнительное кольцевое сопло выполнено в корпусе концентрично охватывающим канал для отвода пробы воздуха к датчику.



Рисунок 1.5 - Схема бесконтактного щупа течеискателя по авторскому свидетельству № 1052904 СССР [48]

На рисунке 1.6 приведена схема бесконтактного щупа течеискателя, в который входит корпус 1, щелевое сопло 2 с каналом 3, к которому подводится сжатый воздух, дополнительное кольцевое сопло 4 с каналом 5 для отвода части пробы воздуха байпасно датчику 6 течеискателя, канал 7 для подвода пробы воздуха к датчику 6, диафрагма 8 с переменной апертурой, шкала-указатель 9 величины апертуры и дроссели 10 и 11 для регулирования расходов сжатого воздуха через щелевое сопло 2 и расхода пробы воздуха из зоны утечки из изделия 12, проверяемого на герметичность.

В авторском свидетельстве № 1211618 СССР [50] предложен вихревой щуп течеискателя. Он содержит корпус с тангенциальными каналами для подвода защитного газа в его полость и с осевым соплом, размещенным в полости корпуса, и капиллярную трубку для отвода пробного газа к течеискателю. С целью повышения чувствительности он снабжен диафрагмой.

Диафрагма размещена в корпусе и образует две полости, в одной из которых расположены конец капиллярной трубки, выходы тангенциальных каналов и один из торцов осевого сопла. Осевое сопло охватывает часть конуса с кольцевым соплом. Вход кольцевого сопла соединен со второй полостью, а выход предназначен для соединения с атмосферой и расположен в плоскости, параллельной плоскости другого торца осевого сопла. Диафрагма выполнена с осевым отверстием, через которое проходит капиллярная трубка с образованием кольцевого канала.

Бесконтактный щуп со струйным логическим переключателем предложен в авторском свидетельстве № 711402 СССР [51]. Он содержит цилиндрический корпус с центральным каналом для отвода пробного газа, сообщенными с ним радиальными отверстиями и кольцевым каналом для подвода к поверхности изделия защитного газа, и переключатель потока защитного газа между указанными каналами.

С целью повышения надежности контроля переключатель потока защитного газа выполнен в виде струйного элемента ИЛИ - НЕ ИЛИ. Выход НЕ ИЛИ этого элемента соединен с радиальными отверстиями, а выход - ИЛИ - с кольцевым каналом. Корпус струйного элемента выполнен с кольцевым выступом, полость которого соединена с центральным каналом.



Рисунок 1.6 - Схема бесконтактного щупа течеискателя по авторскому свидетельству № 560151 СССР [49]

На рисунке 1.7 приведена схема бесконтактного щупа к течеискателю [51]. В цилиндрическом корпусе 1 выполнены центральный канал 2, радиальные отверстия 3 и кольцевой канал 4. Переключатель 5 своим выходом 6 НЕ ИЛИ соединен с радиальным отверстием 3, а выходом 7 ИЛИ - с кольцевым каналом 4. Корпус 1 выполнен с кольцевым выступом 8, полость которого соединена с центральным каналом.



Рисунок 1.7 - Схема бесконтактного щупа течеискателя по авторскому свидетельству № 711402 СССР [51]

В авторском свидетельстве № 945700 СССР [52] предложен щуп течеискателя, который содержит корпус, закрепленную на нем цилиндрическую камеру натекания пробного газа с боковым отверстием для подсоединения через клапан к системе продувки, и последовательно установленные в корпусе по потоку пробного газа датчик и вентилятор. С целью повышения достоверности определения величины утечки он снабжен кожухом. Кожух установлен коаксиально на камере и образует с ней кольцевую полость.

Кольцевая полость связана с системой продувки. В стенке камеры натекания по окружности выполнены дополнительные отверстия. Оси отверстий расположены под углом к касательной, проведенной к основной поверхности камеры, для обеспечения закручивания потока в сторону вращения вентилятора.

#### 1.4.7.2 Масс-спектрометрические течеискатели

Одним из наиболее чувствительных и универсальных методов при испытаниях на герметичность изделий является масс-спектрометрический метод. Он основан на регистрации индикаторного газа, прошедшего в вакуумную камеру течеискателя через дефекты испытываемого изделия. Смеси газов в устройствах при масс-спектрометрическом методе анализа разделяют по массам с помощью электрических или магнитных полей.

В качестве индикаторного газа в масс-спектрометрических течеискателях чаще всего используются гелий, гелиево-воздушная или гелиево-азотная смесь. Гелий является инертным газом и совершенно безвреден. В некоторых массспектрометрических течеискателях вместо гелия используется аргон, водород или другие газы.

В масс-спектрометрических течеискателях наиболее часто используются следующие виды контроля герметичности: обдувание испытываемой поверхно-

сти индикаторным газом, накопление при атмосферном давлении и накопление в вакууме.

При испытаниях на герметичность изделий обдуванием поверхность обдувается через специальный щуп индикаторным газом, в который попадает пробный газ из изделия при наличии микротечи, анализируемый с помощью масс-спектрометра течеискателя.

Испытания на герметичность изделий накоплением при атмосферном давлении состоит в том, что испытываемое на герметичность изделие заполняется индикаторным газом под избыточным давлением, помещается в герметичную камеру, заполненную атмосферным воздухом при нормальном давлении, и по наличию индикаторного газа в замкнутом объеме накопления вокруг изделия делают заключение о герметичности изделия.

При испытаниях на герметичность изделий по накоплению в вакууме испытываемое изделие заполняют индикаторным газом под избыточным давлением, помещают в герметичную, а затем отвакуумированную камеру анализируют на наличие индикаторного газа в ней с помощью масс-спектрометра.

В авторском свидетельстве № 530213 СССР [53] предложен массспектрометрический течеискатель для испытаний на герметичность методом щупа. Он содержит анализатор, насосную систему для создания в нем рабочего давления, щуп с всасывающим и рассеивающим соплами и охлаждаемую азотную ловушку, включенную в линию между анализатором и всасывающим соплом щупа.

С целью упрощения конструкции и повышения чувствительности испытаний охлаждающая ловушка выполнена в виде замкнутого резервуара с отводом к рассеивающему соплу. Течеискатель снабжен сорбционной колонкой, расположенной в охлаждаемой азотной ловушке. На рисунке 1.8 приведена упрощенная схема течеискателя.

Анализатор 1, соединенный с насосной системой, содержит механический 2 и пароструйный 3 насосы. С анализатором 1 соединены щуп 4 с рассеивающим 5 и всасывающим 6 соплами и иглой 7, регулирующей проводимость сопла 6, через охлаждаемую азотную ловушку 8, выполненную в виде резервуара с адсорбционной колонной 9 и адсорбентом 10, трубопровод 11 и входной клапан 12.

Резервуар ловушки 8 заполнен хладоагентом и закрыт крышкой 13, на которой установлен клапан 14, регулирующий давление в резервуаре и соединенный через отвод 15 с рассеивавшим соплом 5. В резервуаре азотной ловушки 8 размещена трубка 16 с возможностью погружения одного ее конца в хладоагент и подсоединения к отводу 15.



Рисунок 1.8 – Схема масс – спектрометрического течеискателя по авторскому свидетельству № 530213 СССР [53]

Масс - спектрометрический течеискатель по авторскому свидетельству № 783611 СССР [54] содержит датчик, камеру для размещения датчика, вакуумный насос, вакуумметры, вымораживающую ловушку и электронную систему с широкодиапазонным стабилизатором напряжения.

Он снабжен также электростатическим цилиндрическим конденсатором с изменяемым углом фокусировки. Широкодиапазонный стабилизатор напряжения электронной системы выполнен с рядом стабилитронов, соответствующих различным пробным газам. С целью подачи в камеру масс-спектрометра пробного газа с наименьшим количеством примесей, он снабжен диффузионный насосом. Насос работает в режиме, рассчитываемым по специальной формуле, приводимой в описании изобретения.
На рисунке 1.9 приведена схема масс-спектрометрического течеискателя по авторскому свидетельству № 783611 СССР [54]. Он содержит датчик 1, с камерой 2, криоэкран 3, заполненный криоагентом, вымораживающую ловушку 4, вакуумный насос низкого вакуума 5, вакуумметр 6, калибровочную течь 7, диффузионный насос 8 и дополнительный диффузионный насос 9, работающий совместно с ловушкой в режиме, рассчитанном по формуле.

В камере 2 установлен цилиндрический конденсатор 10, обладающий фокусирующими свойствами. Ускоряющее напряжение стабилизируется широ-кодиапазонным стабилизатором 11.



Рисунок 1.9 – Схема масс – спектрометрического течеискателя по авторскому свидетельству № 783611 СССР [54]

Блок 12 задает соотношение между ускоряющим напряжением и напряжением, подаваемым на конденсатор. В масс-спектрометрический течеискатель входит также источник ионизации 13, магнитный сепаратор 14 и коллектор 15, выходной сигнал которого индуцируется блоком измерения ионного тока 16.

Способ испытаний на герметичность изделий с использованием массспектрометрических течеискателей разработан в авторском свидетельстве № 1153245 СССР [55], который заключается в том, что изделие помещают в камеру, вакууммируют ее, соединяют с течеискателем, регистрируют фоновый сигнал, заполняют пробным газом, производят выдержку в течение заданного времени и о герметичности делают заключение по изменению сигнала течеискателя по сравнению с фоновым сигналом.

течеискателей Из рассмотренных выше видно, что массспектрометрические методы испытаний на герметичность изделий имеют высокую чувствительность и избирательность. Однако, эти методы и устройства характеризуются высокой трудоемкостью, сложностью аппаратуры, большим временем испытаний и невозможностью непосредственного доступа ко всем частям и участкам испытываемого на герметичность изделия. При контроле герметичности изделий используются также галоидные течеискатели. В качестве индикаторных газов при галоидном методе испытаний на герметичность наиболее часто используют галогенозамещенные углеводороды - фреон, а также шестифтористую серу.

В авторском свидетельстве № 587352 СССР [56] предложен галоидный течеискатель, который содержит щуп с кольцевым соплом подачи сжатого воздуха, два канала отбора смеси пробного газа и воздуха, диафрагму с регулируемой апертурой, размещенной на входе каналов отбора смеси, блок питания сжатым воздухом, дроссель регулирования давления воздуха, галоидный датчик, установленный на выходе одного из каналов отбора смеси, сумматор, входы которого связаны с выходом галоидного датчика и второго канала отбора смеси, и дроссель регулирования расхода смеси, установленный на выходе сумматора.

Течеискатель снабжен также датчиком уровня щупа над испытываемой поверхностью изделия, датчиком давления воздуха, установленным на входе в кольцевое сопло, датчиком расхода смеси, блоком задания функциональной зависимости между уровнем щупа и давлением воздуха и уровнем щупа и расходом смеси.

### 1.5 Примеры технологических схем испытаний на герметичность изделий

Технологическая схема испытаний на герметичность железнодорожных цистерн. Для перевозки нефти и сжиженных углеводородных газов используются железнодорожные цистерны. Существующая технологическая схема испытаний железнодорожных цистерн на прочность и герметичность в управлении железнодорожным транспортом ООО «Оренбурггазпрома» представлена на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 – Технологическая схема испытаний изделий на герметичность, используемая в управлении железнодорожным транспортом ООО «Оребурггазпром»

На рисунке изображены ёмкости 1 и 2, предназначенные для хранения воды, необходимой для испытания цистерн на прочность и герметичность, которые расположены вне помещения в земле. Гидронасос H2 служит для подачи воды из ёмкостей в испытываемую цистерну, а после испытаний - из цистерны в ёмкости.

Гидронасос H1 включается в работу после заполнения водой цистерны и повышает давление в цистерне до заданного значения. Гидронасос H3 предназначен для выкачивания остатков воды из цистерны. В устройство испытаний входит компрессор, который предназначен для создания давления сжатого воздуха и более быстрого заполнения цистерны водой перед испытаниями и опорожнения её после испытаний.

**Технологическая схема испытаний изделий на герметичность в бронекамере** приведена на рисунке 1.11. В бронекамеру 1 с приводом двери 2 и 3 и концевым выключателем 4 подведена напорная магистраль 8 от блока подачи жидкости. Блок подачи жидкости содержит бак 6, гидронасос 7, предохранительный клапан 9 и распределители 10 и 11.

В бронекамере 1 к напорной магистрали 8 подсоединяется испытываемое изделие 5, реле давления 13 с концевым выключателем 14 и гидроцилиндр 16 двустороннего действия с двусторонним штоком 17. В полости 15 установлена пружина 20, а полость 19 гидроцилиндра 16 соединена с гидроаккумулятором 22 и надклапанной полостью 28 гидрозамка 23. Подклапанная полость 30 гидрозамка соединена с магистралью 8. При установке давления по режиму испытания на герметичность шток 17 взаимодействует с выключателем 21 и снимает блокировку с привода двери 2, что даёт возможность производить контроль герметичности изделия.



Рисунок 1.11 - Технологическая схема испытаний на герметичность изделий в бронекамере

### 1.6 Взаимосвязь объектов испытаний на герметичность с устройствами контроля и управления систем испытаний изделий

Из обзора литературных источников, данных сайтов Интернета и практики испытаний изделий на герметичность на промышленных предприятиях можно сделать вывод, что процессы испытаний изделий на герметичность и контроля герметичности изделий практически повсеместно не автоматизированы и в литературе не имеется теоретических положений по расчету и проектированию автоматизированных систем испытаний изделий на герметичность. Учитывая это, проведен анализ существующих технологических процессов систем испытаний изделий на герметичность применительно к созданию автоматизированных систем испытаний и установлены (рисунок 1.12) взаимосвязи объектов испытаний с устройствами автоматизированного контроля герметичности изделий и устройствами автоматического управления и их особенности.

| Автоматизированные системы испытаний изделий   |  |  |   |  |  |  |
|--|--|--|---|--|--|--|
| r  | на гермети   | ичность  | 1   |  |  |  |
| Системы автоматизи-<br>рованного контроля<br>герметичности изделий<br>Устройства автома-<br>тизированного кон-<br>троля герметично-<br>сти изделий<br>Системы автоматиче<br>управления вспомогател | Объекты и<br>таний на го<br>тичность<br>вместно с<br>гими устр<br>вами си<br>испытаний<br>ского<br>пьны- | испы-<br>ерме-<br>(со-<br>дру-<br>ойст-<br>истем<br>)<br>стройстн<br>ния при | Системы автоматическо-<br>го управления (САУ) при<br>испытаниях изделий на<br>герметичность:<br>1 САУ, непосредственно<br>обеспечивающие контроль<br>герметичности изделий;<br>2 САУ подготовительно<br>–заключительных процес-<br>сов испытаний изделий<br>ва автоматического управ-<br>контроле герметичности и |  |  |  |
| вами   |  | ерациях  | к испытаний изделий   |  |  |  |

Рисунок 1.12 – Схема взаимосвязи объектов испытаний на герметичность с устройствами контроля и управления систем испытаний изделий

Отличительные особенности систем автоматизированного контроля герметичности изделий и их объектов содержатся в их функционировании (работе). По этому признаку выделены системы автоматизированного контроля герметичности изделий, системы автоматического управления, которые обеспечивают непосредственно автоматизированный контроль герметичности, системы автоматического управления подготовительно-заключительными операциями испытаний изделий и системы автоматического управления вспомогательными механизмами и устройствами.

Для систем автоматизированного контроля герметичности изделий характерным является функционирование при равных нулю или малых расходах пробной среды (газа или жидкости) в виде утечек и равных нулю или малых изменениях давления (измеряемых в Па) пробной среды на протяжении сравнительно большого отрезка времени (до 60-90 с), в течение которого происходит испытания изделия.

Например, максимально допустимые утечки сжатого воздуха для затворов трубопроводной арматуры с условным диаметром 50 мм составляют 0,09 см<sup>3</sup>/мин. Погрешность измерения утечек при этом не должна превышать ± 0,01 см<sup>3</sup>/мин на всем диапазоне изменения допустимых значений утечек среды. Для систем автоматического управления, которые обеспечиваю автоматизированный контроль герметичности, эти условия функционирования сохраняются за исключением того, что нет необходимости в получении ими абсолютных значений утечек пробной среды или изменений давления.

Для систем автоматического управления, обеспечивающих выполнение подготовительно-заключительных операции испытаний изделий, характерны расходы пробной среды в десятки тысяч раз больше допустимых значений утечек, разности давлений изменяются на единицы или десятки мегапаскалей, а время выполнения операций не должно превышать 1-5 с. Эти и другие особенности функционирования систем автоматизированного контроля и автоматического управления положены в основу выбора направления теоретических и экспериментальных исследований, представленных в следующих ниже разделах.

## **2** Статистические исследования герметичности изделий

### 2.1 Паспортизация неплотностей автотракторных теплообменников при испытаниях на герметичность

# 2.1.1 Методика проведения паспортизации неплотностей соединений теплообменников при испытаниях на герметичность в условиях массового производства

Важнейшей целью паспортизации в машиностроении является получение конкретных данных об исследуемом технологическом процессе или технологическом оборудовании. Паспортизация неплотностей полых изделий при испытаниях на герметичность проведена на примере автотракторных теплообменников, выпускаемых ПО Радиатор (г. Оренбург).

Паспортизация теплообменников проводилась для получения данных о встречающихся видах неплотностей, причинах их возникновения и количественных значениях параметров, характеризующих наиболее вероятные значения утечек воздуха через неплотности при испытаниях на герметичность сердцевин теплообменников и теплообменников в сборе в условиях серийного производства.

В качестве основных математических методов, используемых для получения количественных характеристик параметров процессов испытаний на герметичность теплообменников, выбраны методы математической статистики и теории вероятностей, применяемые для анализа случайных величин [57].

Задачами паспортизации неплотностей соединений теплообменников при испытаниях на герметичность в условиях массового производства являются:

- выявление неплотностей при испытаниях на герметичность сердцевин теплообменников и теплообменников в сборе (радиаторов) в условиях массового производства и выделение основных типов неплотностей;

- осуществление сбора статистических данных по типам неплотностей и по значениям утечек воздуха через неплотности при испытаниях на герметичность в условиях массового производства для 5 типов теплообменников после первого предъявления на испытания;

- осуществление сбора статистических данных по типам неплотностей и по значениям утечек воздуха через неплотности при испытаниях на герметичность в условиях массового производства для 5 типов теплообменников и 5 типов сердцевин теплообменников после повторного их предъявления на испытание.

Статистические исследования герметичности сердцевин теплообменников и теплообменников в сборе проводятся в соответствии со следующими требованиями:

- по каждому типу сердцевин теплообменников и теплообменников в сборе исследуются выборки в объеме не менее 48 штук;

- теплообменники и сердцевины теплообменников для испытания на герметичность и статистического учета должны поступать без какой-либо предварительной сортировки в очередности изготовления их на предыдущих и последующих технологических постах;

- учету подлежит каждый теплообменник (сердцевина), поступивший на пост испытания на герметичность, независимо от того, оказался он герметичным после первого предъявления или после устранения негерметичности и последующих испытаний на герметичность;

- сбор статистических данных может осуществляться на одном или нескольких постах испытания сердцевин теплообменников и теплообменников;

- измерение значения утечек воздуха через неплотности при испытаниях на герметичность сердцевин теплообменников и теплообменников производится приборами, прошедшими метрологические испытания и имеющие специальные удостоверения по поверке;

- утечки воздуха через неплотность каждой сердцевины или теплообменника при испытании на герметичность измеряются с трехкратной повторностью;

- давление сжатого воздуха, подводимого внутрь испытуемых на герметичность сердцевин и теплообменников, устанавливается равным 0,12 МПа.

В процессе испытаний сердцевин и теплообменников в сборе в журнал испытаний заносятся следующие данные: дата испытаний на герметичность сердцевины или теплообменника; тип сердцевины или теплообменника; количество течей в сердцевине или теплообменнике; тип неплотности по принятой классификации неплотностей сердцевин и теплообменников; номер измерения конкретной утечки и ее значение в кубических миллилитрах за секунду; время измерения каждой утечки через неплотности сердцевины или теплообменника в секундах; основные параметры испытания сердцевины и теплообменников на герметичность, такие как: давление воздуха, подводимого внутрь испытуемого изделия, и температура воды, в которую погружаются испытуемые сердцевины или теплообменники.

### 2.1.2 Основные виды неплотностей теплообменников, влияющих на герметичность

Паспортизация неплотностей и измерение утечек воздуха через микрощели проводились в условиях серийного производства теплообменников в ПО Радиатор г. Оренбурга. Было обследовано 600 штук теплообменников шести типов и 370 штук сердцевин теплообменников пяти типов (таблица 2.1).

В результате статистических исследований сердцевин теплообменников и теплообменников на герметичность в условиях серийного производства были выделены следующие пять основных неплотностей: шовная, подопорная, сварная, болтовая и штамповая. Все остальные неплотности наблюдались существенно реже и поэтому объединены в группу общих неплотностей.

Шовная неплотность является результатом того, что на продольном шве трубки сердцевины в результате некачественной пайки появляется одна или не-

сколько микротечей. Наблюдаются также неплотности из-за наличия микрощелей и щелей на поверхности трубок вне шва, которые являются следствием действия растворов травления и очистки поверхностей или дефектов ленты, из которой изготавливают трубки. Этот тип неплотностей относится к шовной неплотности.

Таблица 2.1 - Типы сердцевин теплообменников и теплообменников в сборе, обследованных на герметичность в условиях серийного производства

| Наименование   | Номер   | Тип               | Количество, |
|----------------|---------|-------------------|-------------|
| изделия        | типа    | изделия           | штук        |
|                | изделия |                   |             |
| Теплообменник  | 1       | 45-13.01.010      | 100         |
| автотракторный | 2       | 50-13.01.010/030  | 100         |
|                | 3       | 70У-13.01.010/015 | 100         |
|                | 4       | 85Y-13.010        | 100         |
|                | 5       | 150У-13.010       | 100         |
|                | 6       | 250У-13.010       | 100         |
| Сердцевина     | 1       | 70У-13.016        | 80          |
| теплообменника | 2       | 85Y-13.016        | 80          |
|                | 3       | 150У-13.020       | 76          |
|                | 4       | 250У-13.020       | 54          |
|                | 5       | 250У-27.080       | 80          |

Подопорная неплотность является результатом некачественной развальцовки и пайки концов трубок сердцевин в опорных пластинах. Сварная неплотность является результатом микротечей в сварных соединениях теплообменников. Болтовая неплотность связана с нарушением резинотканевых уплотнений или с недостаточной затяжкой уплотнения с помощью болтовых соединений. Штамповая неплотность является следствием некачественной штамповки стальных деталей теплообменников.

### 2.1.3 Утечки сжатого воздуха через неплотности при испытаниях на герметичность теплообменников в условиях серийного производства

Измерение утечек воздуха через микрощели теплообменников при испытаниях на герметичность осуществляется по схеме, приведенной на рисунке 2.1. В резервуар 1, заполненный водой, погружается теплообменник 2. К теплообменнику 2 по трубопроводу 9 подводится сжатый воздух давлением 0,12 МПа.



Рисунок 2.1 - Схема измерения утечек воздуха через микрощели теплообменников при испытаниях на герметичность

К резервуару жестко прикреплена стойка 3 с двумя поперечинами 4, расположенными выше резервуара. На поперечины 4 устанавливается пластина 5, на которой закреплен измерительный стеклянный цилиндр 6. Цилиндр 6 имеет сверху герметичное дно, а внизу соединен гибким трубопроводом 7 с воронкой 8.

Перед началом измерения снимают пластину 5 с цилиндром 6 и погружают их в воду таким образом, чтобы вся система заполнилась водой. После этого, не извлекая воронку 8 из воды, плавно поднимают пластину 5 с цилиндром 6 вверх и навешивают на поперечины 4 напротив участка воды, в котором отсутствуют пузырьки воздуха, выходящие через микрощель теплообменника.

Берут отсчет положения уровня жидкости по измерительному цилиндру 6. Перемещают воронку 8 в воде резервуара, помещают над микрощелью, из которой поступают воздушные пузырьки, и включают секундомер. После заданного промежутка времени испытания теплообменника на герметичность смещают воронку 8 вне зоны пузырьков и берут второй отсчет уровня жидкости в измерительном цилиндре 6.

Полученный объем утечек воздухе через микрощель теплообменника и время измерения заносятся в журнал испытаний. Измерения утечек через каждую микрощель проводятся с трехкратной повторностью. В качестве измерительного цилиндра используется стеклянный измерительный цилиндр на 100 см<sup>3</sup> с ценой деления 1 см<sup>3</sup> по ГОСТ 1770-74 [58].

#### 2.1.4 Построение гистограмм эмпирического распределения утечек воздуха при статистических испытаниях на герметичность сердцевин теплообменников и теплообменников в сборе

По результатам статистических исследований герметичности сердцевин теплообменников и теплообменников в сборе в условиях серийного производства получено статистическое множество данных. Каждое наблюдаемое значение герметичности изделия обозначено через  $x_i$  и является случайной величиной. По методике [57] строились гистограммы эмпирического распределения утечек воздуха через неплотности сердцевин и теплообменников в сборе при испытаниях их на герметичность.

Для построения гистограмм эмпирических распределений для каждого типа сердцевин или теплообменника в сборе выбраны общие границы изменения герметичности для того, чтобы гистограммы были сопоставимыми. Минимальное значение утечек воздуха через микрощели  $x_{min} = 0 \text{ см}^3/\text{мин}$ , а максимальное –  $x_{max} = 1000 \text{ см}^3/\text{мин}$ . Весь диапазон изменения случайной величины (утечек воздуха) разбит на 10 интервалов: 0 – 100, 101 – 200, 201 – 300 и так далее до 901 – 1000 см<sup>3</sup>/мин.

Гистограммы эмпирических распределений утечек воздуха через неплотности сердцевин и теплообменников в сборе приведены на рисунках 2.2 и 2.3.





Рисунок 2.2 - Гистограммы распределения утечек воздуха при испытаниях на герметичность теплообменников типа 45 - 13.01.010 (вверху) и типа 50 – 13.01.010/30 (внизу)

Они построены в координатах: Q – утечки сжатого воздуха в см<sup>3</sup>/мин и  $n_i$  – относительная частота. Относительная частота (частость) представляет собой отношение частоты повторения случайной величины на каждом интервале ее изменения к числу измерений (опытов) для каждого типа сердцевины или теплообменника в сборе. Обобщенные данные по статистическим исследованиям утечек сердцевин теплообменников и теплообменников в сборе приведены на рисунках 2.4 и 2.5.





Рисунок 2.3 - Гистограммы распределения утечек воздуха при испытаниях на герметичность сердцевин типа 70У - 13.016 (вверху) и типа 85У – 13.016 (внизу) автотракторных теплообменников





Рисунок 2.4 - Обобщенные гистограммы распределения утечек воздуха при испытаниях на герметичность теплообменников в сборе шести типов (вверху) и сердцевин пяти типов (внизу) теплообменников



Рисунок 2.5 - Обобщенная гистограмма распределения утечек воздуха при испытаниях на герметичность сердцевин (пяти типов) теплообменников и теплообменников в сборе (шести типов)

#### 2.1.5 Определение основных статистических параметров утечек воздуха при испытаниях на герметичность сердцевин теплообменников и теплообменников в сборе

Центральные моменты  $M_1 - M_4$  утечек воздуха по статистическим данным испытаний на герметичность сердцевин и теплообменников в сборе вычислялись по формулам [59]:

$$M_{1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_{i}; \quad M_{2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_{i} - M_{1})^{2}; \quad M_{3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_{i} - M_{1})^{3}; \quad M_{4} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_{i} - M_{1})^{4},$$

а коэффициенты асимметрии и эксцесса соответственно по формулам [59]:

$$q_1 = \frac{M_3}{\sqrt{M_2^3}}$$
 IV  $q_2 = \frac{M_4}{M_3^2} - 3$ ,

где  $x_i$  - значение случайной величины,

*n* – число измерений случайной величины.

Первый центральный момент представляет собой среднее арифметическое значение случайной величины  $x_{cp}$ , второй - дисперсию  $\sigma^2$ , то есть,  $x_{cp} = M_1$ , а  $\sigma^2 = M_2$ .

Центральные моменты  $M_2$ ,  $M_3$  и  $M_4$  вычисляются по основным моментам  $m_2$ ,  $m_3$  и  $m_4$ , которые определяются по следующим соотношениям (учитывая, что  $m_1 = M_1$ ) [57]:

$$m_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=n}^n x_i^2$$
;  $m_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=n}^n x_i^3$ ;  $m_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=n}^n x_i^4$ .

В таблицах 2.2 и 2.3 приведены значения основных и центральных моментов и коэффициентов асимметрии и эксцесса для теплообменников и сердцевин теплообменников, испытываемых на герметичность.

| Обозна-<br>чение    | Номер типа теплообменника |       |       |       |       |       |       |  |  |
|---------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|
| ПАРА-<br>МЕТРА      | 1                         | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 1-6   |  |  |
| Ν                   | 100                       | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 600   |  |  |
| $M_1$               | 20,8                      | 76,6  | 51,2  | 85,4  | 41,4  | 42,0  | 52,9  |  |  |
| $M_2 \cdot 10^{-2}$ | 45,5                      | 272,8 | 154,2 | 552,8 | 123,9 | 196,0 | 224,2 |  |  |
| $M_3 \cdot 10^{-6}$ | 1,0                       | 13,0  | 6,2   | 41,5  | 4,1   | 1,1   | 12,7  |  |  |
| $M_4 \cdot 10^{-8}$ | 2,4                       | 74,7  | 31,5  | 344,6 | 14,3  | 653,0 | 88,8  |  |  |
| $M_2 \cdot 10^{-2}$ | 41,2                      | 214,1 | 128,0 | 479,8 | 106,8 | 178,3 | 196,2 |  |  |
| $M_3 \cdot 10^{-5}$ | 7,7                       | 75,9  | 40,6  | 285,0 | 26,9  | 84,2  | 94,4  |  |  |
| $M_4 \cdot 10^{-8}$ | 1,7                       | 43,5  | 21,1  | 225,0 | 8,7   | 49,2  | 65,4  |  |  |
| $Q_1$               | 2,9                       | 2,4   | 2,8   | 2,7   | 2,4   | 3,6   | 3,4   |  |  |
| $Q_2$               | 6,8                       | 6,5   | 9,9   | 6,8   | 4,6   | 12,5  | 14,0  |  |  |

Таблица 2.2 - Статистические параметры исследования герметичности теплообменников

Коэффициенты асимметрии и эксцесса для всех типов сердцевин и теплообменников положительные. Это указывает на то, что кривые распределения негерметичности сердцевин и теплообменников, испытуемых на герметичность, островершинные [57]. Эти результаты экспериментальных исследований позволяют считать, что кривые распределения негерметичности сердцевин и теплообменников имеют один из видов типовых кривых распределения случайной величины. Для сравнения дисперсий случайной величины между собой могут использоваться различные критерии, например, критерий F(x) Фишера [57]:

$$F(x) = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}.$$

Таблица 2.3 - Статистические параметры исследования герметичности сердцевин теплообменников и обобщенных параметров сердцевин и теплообменников в сборе

| Обо-                |                                      |       |       |       |       |       |       |  |  |
|---------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|
| ЗНАЧЕ-              | Номер типа сердцевины теплообменника |       |       |       |       |       |       |  |  |
| НИЕ                 |                                      |       |       |       |       |       | ПАРА- |  |  |
| ПАРАМЕ              | 1                                    | 2     | 3     | 4     | 5     | 1-5   | МЕТРЫ |  |  |
| ТРА                 | _                                    | _     | _     | -     | _     |       |       |  |  |
| N                   | 80                                   | 80    | 76    | 54    | 80    | 370   | 970   |  |  |
| $M_1$               | 87,8                                 | 58,7  | 44,0  | 51,7  | 68,9  | 56,6  | 54,3  |  |  |
| $M_2 \cdot 10^{-2}$ | 507,1                                | 342,8 | 35,2  | 355,1 | 424,2 | 344,5 | 266,3 |  |  |
| $M_3 \cdot 10^{-6}$ | 38,0                                 | 26,6  | 1,2   | 28,2  | 31,5  | 25,1  | 17,4  |  |  |
| $M_4 \cdot 10^{-8}$ | 320,0                                | 288,2 | 175,0 | 238,7 | 249,6 | 208,0 | 134,0 |  |  |
| $M_2 \cdot 10^{-2}$ | 43,0                                 | 308,3 | 272,0 | 328,0 | 376,8 | 302,4 | 236,8 |  |  |
| $M_3 \cdot 10^{-5}$ | 259,0                                | 209,0 | 180,0 | 230,0 | 234,0 | 198,0 | 134,0 |  |  |
| $M_4 \cdot 10^{-8}$ | 208,0                                | 172,0 | 139,0 | 186,0 | 174,0 | 157,0 | 100,0 |  |  |
| $Q_1$               | 2,9                                  | 3,9   | 4,1   | 3,9   | 3,2   | 3,8   | 3,7   |  |  |
| $Q_2$               | 8,3                                  | 15,2  | 15,8  | 14,2  | 9,3   | 14,2  | 15,0  |  |  |

Обычно выбираются  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  таким образом, чтобы  $\sigma_1^2 \succ \sigma_2^2$ , то есть за  $\sigma_1^2$  принимается большая из двух дисперсий. Вычисленное значение F(x) сравнивается с табличным значением [57]. При случайном расхождении между оценками  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_2^2$  вычисленное значение F(x) должно быть меньше табличного значения. В этом случае выбранные частичные совокупности можно отнести к одной общей совокупности случайной величины с одинаковой дисперсией.

В таблицах 2.4 и 2.5 приведены вычисленные значения F(x) по дисперсиям для всех пар типов теплообменников и сердцевин теплообменников (один тип с другим и с общей дисперсией для всей совокупности теплообменников (колонки 1 – 5 таблицы 2.5).

Значения F(x) вычислены в предположении нормального закона распределения герметичности теплообменников и сердцевин теплообменников. Однако, гистограммы распределения герметичности теплообменников и сердцевин теплообменников, приведенные на рисунках 2.2 – 2.5, вероятно, наиболее полно соответствуют распределению Пуассона. Экспоненциальное распределение также не подходит, так как уменьшение частостей на гистограммах происходит существенно интенсивнее, чем по экспоненте.

Для распределения Пуассона математическое ожидание (среднее арифметическое значение) и дисперсия равны между собой и равны параметру  $\lambda$  [57], то есть,

$$x_{cp} = \sigma^2 = \lambda.$$

Учитывая это соотношение, вычислены значения функции F(x) по отношению двух математических ожиданий для пары сравниваемых изделий (теплообменников и сердцевин) и приведены в таблицах 2.6 и 2.7.

| Номер т   | ГИПА |       | <b>_</b> |      |       |      |      |      |
|-----------|------|-------|----------|------|-------|------|------|------|
| ТЕПЛООБМЕ | EH-  | 1     | 2        | 3    | 4     | 5    | 6    | 1-6  |
| НИКА      |      |       |          |      |       |      |      |      |
| 1         |      | -     | 27,1     | 9,7  | 135,9 | 6,7  | 18,8 | 83,8 |
| 2         |      | 2,7   | -        | 2,8  | 5,0   | 4,0  | 1,4  | 3,1  |
| 3         |      | 9,7   | 2,8      | -    | 14,1  | 1,4  | 1,9  | 8,7  |
| 4         |      | 135,9 | 5,0      | 14,1 | -     | 20,2 | 7,2  | 6,0  |
| 5         |      | 6,7   | 4,0      | 1,4  | 20,2  | -    | 2,8  | 3,4  |
| 6         |      | 18,8  | 1,4      | 1,9  | 7,2   | 2,8  | _    | 1,2  |
| 1 - 6     |      | 83,8  | 3,1      | 8,7  | 6,0   | 3,4  | 1,2  | -    |

Таблица 2.4 - Значения функции Фишера F(x), определенные по значениям дисперсии герметичности для различных пар теплообменников

Таблица 2.5 - Значения функции Фишера *F(x)*, определенные по значениям дисперсии герметичности для различных пар сердцевин теплообменников

| Номер типа<br>сердцевины | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 1 - 5 |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 1                        | -   | 1,9 | 9,5 | 1,7 | 1,3 | 2,0   |
| 2                        | 1,9 | -   | 1,3 | 1,1 | 1,5 | 1,0   |
| 3                        | 9,5 | 1,3 | -   | 1,4 | 1,9 | 1,3   |
| 4                        | 1,7 | 1,1 | 1,4 | -   | 1,3 | 1,9   |
| 5                        | 1,3 | 1,5 | 1,9 | 1,3 | _   | 2,5   |
| 1 - 5                    | 2,0 | 1,0 | 1,3 | 1,9 | 2,5 | -     |

В таблице 2.8 приведены значения F(x) при сравнивании  $\sigma^2$  и  $x_{cp}$  для выборки каждого типа теплообменников и каждого типа сердцевин теплообменников с  $\sigma^2$  и  $x_{cp}$  для выборки, содержащей все испытанные на герметичность теплообменники и сердцевины теплообменников с общим количеством 670 штук.

Табличное значение F(x) = 1,4 [57] при вероятности  $\alpha = 0,95$  и числе изделий  $n_1 = n_2 = 100$  штук, а при вероятности  $\alpha = 0,99$  значение F(x) = 1,6.

Из данных таблицы 2.4 видно, согласно значениям функции F(x), что между всеми типами теплообменников, рассматриваемых попарно между собой, имеются существенные различия. Таким образом, с вероятностью  $\alpha = 0.95$  можно утверждать, что выборки негерметичности всех типов теплообменников не относятся к одной генеральной совокупности.

Однако, в соответствии с данными таблицы 2.6 различия между выборками случайные. К таким типам теплообменников относятся, например, 2 и 4; 3 и 5; 3 и 6; 3 и 1- 6; 5 и 6; 5 и 1- 6; 6 и 1- 6.

Таблица 2.6 - Значения функции Фишера F(x), определенные по средним арифметическим значениям герметичности для различных пар теплообменни-ков

| Номер типа<br>теплообмен- | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 1 - 6 |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| НИКА                      |      |      |      |      |      |      |       |
| 1                         | -    | 3,67 | 2,45 | 4,10 | 1,99 | 2,02 | 2,54  |
| 2                         | 3,67 | -    | 1,50 | 1,12 | 1,85 | 1,83 | 1,45  |
| 3                         | 2,45 | 1,50 | -    | 1,67 | 1,23 | 1,22 | 1,03  |
| 4                         | 4,10 | 1,12 | 1,67 | -    | 2,06 | 2,04 | 1,62  |
| 5                         | 1,99 | 1,85 | 1,23 | 2,06 | -    | 1,-1 | 1,28  |
| 6                         | 2,02 | 1,83 | 1,22 | 2,04 | 1,01 | -    | 1,26  |
| 1 - 6                     | 2,54 | 1,45 | 1,03 | 1,62 | 1,28 | 1,26 | -     |

Таблица 2.7 - Значения функции Фишера *F(x)*, определенные по средним арифметическим значениям герметичности для различных пар сердцевин

| Номер типа | 1    | 2    | 3    | 1    | 5    | 1_5  |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| СЕРДЦЕВИНЫ | 1    | 2    | 5    | 4    | 5    | 1-5  |
| 1          | -    | 1,50 | 1,99 | 1,70 | 1,27 | 1,55 |
| 2          | 1,50 | -    | 1,34 | 1,13 | 1,17 | 1,04 |
| 3          | 1,99 | 1,34 | -    | 1,18 | 1,57 | 1,29 |
| 4          | 1,70 | 1,13 | 1,18 | -    | 1,33 | 1,09 |
| 5          | 1,27 | 1,17 | 1,57 | 1,33 | -    | 1,22 |
| 1-5        | 1,55 | 1,04 | 1,29 | 1,09 | 1,22 | -    |

На основании данных таблиц 2.5 и 2.7 можно констатировать, что статистические выборки почти всех сердцевин теплообменников как при вычислении функции F(x) по дисперсиям, так и по математическим ожиданиям, относятся к одной генеральной совокупности и различия между ними случайные, Об этом подтверждают также данные таблицы 2.8.

В таблицах 2.9 и 2.10 приведены общие числовые значения и значения в процентах негерметичности сердцевин и теплообменников, а также распределение негерметичных теплообменников по видам негерметичности при исследовании их на герметичность в условиях серийного производства.

Около 18 % теплообменников и сердцевин теплообменников имеют течи при испытаниях на герметичность. Наиболее распространенными типами течи в теплообменниках являются шовная (10,1 %) и подопорная (6,3 %).

На основании статистических исследований герметичности сердцевин теплообменников и теплообменников в сборе можно предположить, что все

статистические выборки как сердцевин, так и теплообменников в общем относятся к одной генеральной совокупности.

Таблица 2.8 – Значения функции Фишера F(x) для конкретных типов теплообменников и сердцевин по отношению к  $\sigma^2$  и  $x_{cp}$ , определенных для всей совокупности теплообменников и сердцевин, испытуемых на герметичность

| Цанионора   | Тип изло  | Функция $F(x)$ , определенная по |          |  |
|-------------|-----------|----------------------------------|----------|--|
| Паименова-  | Тип изде- | отношению пар значений           |          |  |
| ние изделия | ЛИЯ       | $\sigma^2$                       | $x_{cp}$ |  |
|             | 1         | 54,0                             | 2,6      |  |
|             | 2         | 2,0                              | 1,4      |  |
|             | 3         | 5,6                              | 1,1      |  |
| Теплообмен- | 4         | 4,1                              | 1,6      |  |
| ник         | 5         | 4,9                              | 1,3      |  |
|             | 6         | 1,8                              | 1,3      |  |
|             | 1 - 6     | 1,4                              | 1,0      |  |
|             | 1         | 3,3                              | 1,6      |  |
|             | 2         | 1,7                              | 1,1      |  |
| Сердцевина  | 3         | 1,3                              | 1,2      |  |
| теплообмен- | 4         | 1,9                              | 1,1      |  |
| ника        | 5         | 2,5                              | 1,3      |  |
|             | 1 - 5     | 1,6                              | 1,0      |  |

Это связано с тем, что основным элементом и теплообменников в сборе и сердцевин теплообменников являются трубки сердцевин, изготавливаемые в автоматизированном режиме. Однако, технологические процессы сборки теплообменников вносят существенные изменения в выборки каждого типа теплообменников.

Таблица 2.9 - Количество негерметичных теплообменников по результатам статистических исследований в условиях серийного производства статистических исследований в условиях серийного производства

|        |       | Негерметичных |        | Негерметичных теплообменников |                          |       |        |  |
|--------|-------|---------------|--------|-------------------------------|--------------------------|-------|--------|--|
| Тип    | Коли  | ТЕПЛООБМ      | ЛЕННИ- | ПО ВИДАМ                      | ПО ВИДАМ НЕГЕРМЕТИЧНОСТИ |       |        |  |
| ТЕПЛО- | ЧЕСТ- | КОВ           |        |                               |                          |       |        |  |
| ОБМЕН- | BO    |               |        | Шов-                          | Подо-                    | Бол-  | Другие |  |
| НИКА   |       | Штук          | %      | НАЯ                           | ПОРНАЯ                   | ТОВАЯ | ВИДЫ   |  |
| 1      | 100   | 10            | 10     | 4                             | 5                        | 1     | 0      |  |
| 2      | 100   | 29            | 29     | 21                            | 7                        | 1     | 0      |  |
| 3      | 100   | 22            | 22     | 20                            | 2                        | 0     | 0      |  |
| 4      | 100   | 16            | 16     | 4                             | 9                        | 2     | 1      |  |
| 5      | 100   | 16            | 16     | 7                             | 9                        | 0     | 0      |  |
| 6      | 100   | 11            | 11     | 5                             | 6                        | 0     | 0      |  |
| 1-6    | 600   | 104           | 17,3   | 10,1                          | 6,3                      | 0,7   | 0,2    |  |

Таблица 2.10 - Количество негерметичных сердцевин теплообменников по результатам статистических исследований в условиях серийного производства

| Номер типа |           | Негерметичных | СЕРДЦЕВИН ТЕ- |
|------------|-----------|---------------|---------------|
| СЕРДЦЕВИНЫ |           | ПЛООБМЕННИКОВ |               |
| ТЕПЛООБ-   | оличество |               | 0/_           |
| МЕННИКА    |           | тук           | /0            |
| 1          | 80        | 20            | 25,0          |
| 2          | 80        | 17            | 21,2          |
| 3          | 76        | 7             | 9,2           |
| 4          | 54        | 6             | 11,1          |
| 5          | 80        | 15            | 18,8          |
| 1 - 5      | 370       | 65            | 17,6          |

#### 2.2 Статистические исследования причин негерметичности предохранительных и перепускных клапанов гидравлических систем

### 2.2.1 О случайности расхождения между средними значениями износа перепускных и предохранительных клапанов

Износ деталей сопряжений клапанов зависит в каждом конкретном случае от целого ряда физических, технологических и эксплуатационных факторов. В зависимости от качества материалов деталей сопряжений клапанов, их термообработки, условий взаимодействия между собою и с рабочей жидкостью и условий эксплуатации значения износа клапанов и седел достигают различных значений. Износ деталей и сопряжений клапанов имеет вероятностный характер и является случайной величиной. Статистические исследования проводятся с целью установления количественных показателей износа деталей сопряжения клапан – седло предохранительных и перепускных клапанов гидравлических систем автоматизации и управления, влияния этого износа на герметичность клапанов и подтверждения предположения о том, что несмотря на различие в геометрических размерах клапанов, различия их функционального назначения и принципа действия, износ деталей сопряжений клапан – седло должен характеризоваться почти одинаковыми количественными показателями.

На рисунках 2.6 – 2.9 приведены в качестве примеров фотографии изношенных деталей клапанов гидравлических систем автоматизации и управления. Статистические исследования износа сопряжений перепускных и предохранительных клапанов проведены по ширине фасок седел. Для этого по микрометражным картам для каждого клапана вычисляется среднее значение ширины фаски седла.

Измерение фаски седла производится в восьми сечениях, а поэтому среднее значение фаски представляет собой среднеарифметическое значение измерений в восьми сечениях. По полученным данным строятся полигоны распределения.

На рисунке 2.10 приведены графики эмпирической и выровненной кривой для ширины фасок седел перепускных клапанов.

Выравнивание эмпирических распределений по гипотетическим теоретическим производится по закону модуля разностей со смещенным центром группирования исходного распределения по закону Гаусса [60]:



Рисунок 2.6 – Зона износа шарового предохранительного клапана (Увеличение 75х)



Рисунок 2.7 – Седло предохранительного клапана с эксцентриситетом (Увеличение 15х)



Рисунок 2.8 – Зона износа перепускного клапана (Увеличение 100х)



Рисунок 2.9 – Перепускной клапан со значительным эксцентриситетом (Увеличение 5х)



Рисунок 2.10 – Эмпирическая и выровненная кривые распределения ширины фасок седел перепускных клапанов

$$y = \varphi(x) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \left[ e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_0}} + e^{-\frac{(x+\bar{x})^2}{2\sigma_0}} \right], \quad (2.1)$$

где *х* – текущее значение случайной величины, мкм;

x,  $\sigma_0$ - среднее арифметическое и среднее квадратическое значения случайной величины, мкм, мкм<sup>2</sup>.

На рисунке 2.11 приведены эмпирическая и выровненная кривые распределения ширины фасок седел предохранительных клапанов. Статистические значения параметров приведены в таблице 2.11.

Выравнивание по этому закону обеспечивает необходимую сходимость эмпирических распределений износа сопряжений перепускных и предохранительных клапанов с теоретическим законом распределения случайной величины.



Рисунок 2.11 – Эмпирическая и выровненная кривые распределения ширины фасок седел предохранительных клапанов

Таблица 2.11 - Статистические параметры средних значений ширины фасок седел перепускных и предохранительных клапанов и эксцентриситетов в сопряжениях клапан – седло

| Статистические параметры | Тип<br>клапана         | М <sub>0</sub> ,<br>мкм | М <sub>Е</sub> ,<br>мкм | -<br>Х,<br>МКМ | σ <sub>х,</sub><br>мкм <sup>2</sup> |
|--------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------------------|
| 1                        | 2                      | 3                       | 4                       | 5              | 6                                   |
| Средние значения         | Перепускной            | 332                     | 335                     | 342            | 176                                 |
| дел                      | Предох-<br>ранительный | 361                     | 362                     | 363            | 174                                 |
| Эксцентриситет в         | Перепускной            | 43,9                    | 59,4                    | 64,0           | 41,3                                |
| пан-седло                | Предох-<br>ранительный | 91,9                    | 101,9                   | 120,5          | 76,9                                |

Определение случайности расхождения между средней шириной фасок седел перепускных и предохранительных клапанов произведено по оценке расхождения между двумя выборочными средними по критерию Стьюдента [60], выборочными дисперсиями с использованием распределения Р. Фишера [60] и выборками по *x* - критерию Ван-дер-Вардена [57]. Критерий Ван-дер-Вардена является наиболее эффективным, когда не выполняется условие нормального распределения генеральных совокупностей случайной величины.

Продолжение таблицы 2.11

| 1 / /                |             |                |      |      |
|----------------------|-------------|----------------|------|------|
| Статистические пара- | Тип         | D <sub>x</sub> | Ρ(λ) | λ    |
| метры                | клапана     |                |      |      |
| 1                    | 2           | 7              | 8    | 9    |
| Средние значения     | Перепускной | 3103           | 0,94 | 0,53 |
| ширины фасок селел   |             |                |      |      |
| ширины фасок седен   | Предохрани- |                |      |      |
|                      | тельный     | 3059           | 0,88 | 0,63 |
| Эксцентриситет в со- | Перепускной | 1706           | 0,27 | 1,01 |
| пражениях клапан-    |             |                |      |      |
| приженних кланан-    | Предох-     |                |      |      |
| седло                |             | 5010           | 0.25 | 1.07 |
|                      | ранитсльный | 5919           | 0,23 | 1,07 |

Значение критерий Стьюдента  $t^c$  определяется по формуле [57]:

$$t^{c} = \frac{\left|\bar{x}_{1} - \bar{x}_{2}\right|}{\sqrt{\frac{\sigma_{x1}^{2}}{n_{1} - 1} + \frac{\sigma_{x2}^{2}}{n_{2} - 1}}},$$
(2.2)

где  $x_1, x_2$ ,  $\sigma_{x1}$ ,  $\sigma_{x2}$  - эмпирические средние арифметические значения и дисперсии ширины фасок седел предохранительных и перепускных клапанов, мкм, мкм<sup>2</sup>;

 $n_1$ ;  $n_2$  - число наблюдений, штук ( $n_1 = 88$ ;  $n_2 = 80$ ).

Вычисленное значение критерия Стьюдента для данных выборок  $t^c = 0,76$ . Табличное значение критерия Стьюдента при вероятности P = 0,95 и числе степеней свободы 166  $t_0^c = 1,96$ , а при вероятности P = 0,99  $t_0^c = 2,58$ . Так как  $t^c = 0,76 < t_0^c = 1,96$ , то различие в значениях средней ширины фасок седел перепускных и предохранительных клапанов несущественно.

Для оценки случайности расхождения между двумя выборочными дисперсиями использовалась функция  $F^{\phi}$  [57], которая соответствует F – распределению Фишера:

$$F^{\phi} = \frac{\sigma_{x1}^{2}}{\sigma_{x2}^{2}}.$$
 (2.3)

Расчетное значение  $F_1^{\phi} = 1,017$ . Табличное значение при вероятности P = 0,95 для числа степеней свободы  $n_1 = 87$  и  $n_2 = 79$   $F_0^{\phi} = 1,370$ . Так как  $F_1^{\phi} = 1,017 < F_0^{\phi} = 1,370$ , то расхождение между двумя выборочными дисперсиями несущественно.

При использовании критерия Ван-дер-Вардена проверяется нулевая гипотеза по величине x [57] по соотношению:

$$x = \sum_{r} \psi \left( \frac{r}{n_1 + n_2 + 1} \right), \tag{2.4}$$

где *х* – значение критерия Ван-дер-Вардена;

 $\Psi\left(\frac{r}{n_1 + n_2 + 1}\right)$ - функция, обратная функции распределения

нормированного нормального распределения;

r – ранговая величина, которой придаются значения выборок  $n_1$  и  $n_2$ , штук;

*n*<sub>1</sub>, *n*<sub>2</sub> – число измерений ширины фасок предохранительных и перепускных клапанов, штук.

Значение критерия Ван-дер-Вардена вычисляется по формуле (2.4) после упорядочения всех  $n_1 + n_2$  и присвоения каждому значению ширины фасок седел рангового числа. Величине *r* придается вначале значение всех ранговых чисел выборки  $n_1$ , а потом - выборки  $n_2$ . Причем сумма значений *x*, вычисленных для выборки  $n_1$  и  $n_2$ , должна быть равной нулю. Это служит проверкой правильности расчетов по данному критерию.

Расчетное значение критерия Ван-дер-Вардена  $x_p = 2,83$ . Табличное значение [57]  $x_t = 6,47$  для вероятности 0,95. Так как 2,83 < 6,47, то расхождение между двумя выборками несущественны и различие между шириной фасок перепускных и предохранительных клапанов случайны.

Таким образом, на основании статистических исследований установлено, что расхождение между средней шириной фасок седел перепускных и предохранительных клапанов несущественны. Влияние переходного режима на износ деталей сопряжения перепускной клапан – седло несущественно. Износ сопряжений клапан–седло как перепускных, так и предохранительных клапанов определяется в основном режимом перегрузки.

#### 2.2.2 Исследование величины и ориентации эксцентриситетов сопряжений клапан – седло предохранительных и перепускных клапанов

Исследованиями установлено, что в процессе изнашивания клапанов появляется эксцентриситет в сопряжениях клапан – седло, который оказывает существенное влияние на утечки рабочей жидкости и регулировочные характеристики клапанов. Настоящими исследованиями устанавливается различие эксцентриситетов предохранительных клапанов по сравнению с эксцентриситетами перепускных, а также закономерность ориентации эксцентриситетов сопряжений клапан – седло по отношению к корпусу клапанного устройства.

На рисунке 2.12 приведены графики эмпирического и выровненного (по закону модуля разностей со смещенным центром группирования исходного распределения по закону Гаусса) распределения для эксцентриситетов фасок седел перепускных клапанов, а на рисунке 2.13 - для предохранительных клапанов. Значения статистических параметров приведены в таблице 2.11.



Рисунок 2.12 – Эмпирическая и выровненная кривые распределения эксцентриситетов фасок седел перепускных клапанов

Оценка случайности расхождения между выборочными средними эксцентриситетов фасок седел предохранительных и перепускных клапанов произведена по критерию Стьюдента для вероятности, равной 0,95, и числа степеней свободы, равного  $n_1 + n_2 - 2 = 166$ .



Рисунок 2.13 – Эмпирическая и выровненная кривые распределения эксцентриситетов ширины фасок седел предохранительных клапанов

Вычисленное значение критерия Стьюдента по формуле (2.2) равно 5,80, а табличное значение 1,96. Таким образом, критерий Стьюдента устанавливает существенность различия между выборочными средними эксцентриситетов сопряжений клапан – седло перепускных и предохранительных клапанов.

Выборочная функция, соответствующая *F*-распределению Фишера, определена по выборочным дисперсиям по формуле (2.3),  $F_1^{\phi} = 3,47$ . Табличное значение  $F_0^{\phi} = 1,37$ . Так как  $F_1^{\phi} = 3,47 > F_0^{\phi} = 1,37$ , то различие между выборочными дисперсиями, а соответственно и между значениями эксцентриситетов сопряжений клапан–седло перепускных и предохранительных клапанов существенны.

Использование рангового x – критерия Ван-дер-Вардена также указывает на существенное различие между выборками для эксцентриситетов перепускных и предохранительных клапанов, Расчетное значение  $x_p = 7,96$ . Табличное значение  $x_t = 6,47$ , то есть  $x_t = 6,47 < x_p = 7,96$  и нулевая гипотеза о случайности расхождения отвергается.

Несмотря на то, что средняя ширина фасок седел перепускных и предохранительных клапанов имеют почти одинаковые значения, эксцентриситет фасок предохранительных клапанов значительно больше, чем эксцентриситет седел перепускных клапанов. Эксцентриситет сопряжений предохранительный клапан – седло больше, чем у перепускных клапанов в 2,15 раза, если оценивать его по модальным значениям.

Такое различие в значениях эксцентриситетов обоих клапанов связано с тем, что перепускной клапан ограничен направляющей втулкой и корпусом клапанного устройства и не может значительно отклоняться в сторону. Предохранительный клапан не центрируется в корпусе специальными устройствами. Для снижения утечек рабочей жидкости и увеличения долговечности клапанов целесообразно установить, имеет ли эксцентриситет сопряжений клапан - седло определенную ориентацию относительно корпуса клапанного устройства. Если имеется такая ориентация, то, вероятно, что она связана с конструктивными особенностями этого устройства и должна быть устранена.

Наличие какой-либо определенной ориентации эксцентриситета и устанавливается статистическими исследованиями как перепускных, так и предохранительных клапанов, поступающих в ремонт. С этой целью перед извлечением седел перепускных клапанов из корпусов клапанных устройств в определенных местах ставятся специальные метки. Метки на седлах клапанов соответствовали первому сечению при их микрометрировании.

Микрометрирование ширины фасок седел проводится в восьми сечениях, расположенных под углом 45<sup>0</sup> от первого сечения. По полученным значениям ширины фасок перепускных клапанов для первого, третьего и пятого сечений строятся полигоны распределения. Эмпирические распределения выравниваются по гипотетическим теоретическим по закону модуля разности со смещенным центром группирования исходного распределения по закону Гаусса.

На рисунке 2.14 приведены графики эмпирического и выровненного распределения для ширины фасок седел перепускных клапанов в первом сечении, а на рисунке 2.15 - в пятом сечении. Значения статистических параметров приведены в таблице 2.12.

Установлена существенность различия между арифметическими средними, дисперсиями и выборочными значениями для сечения 1 относительно сечения 3 и сечения 1 относительно сечения 5 для перепускных клапанов.

Число объектов исследования для каждого сечения равно 88. Расчетное значение критерия Стьюдента для сечений 1 и 3 согласно формуле (2.2) равно 0,554. Табличное значение для вероятности 0,95 и числа степеней свободы равно 1,96. Расчетное значение критерия Стьюдента для сечений 1- 5 равно 0,866. Расхождение между арифметическими средними для фасок седел перепускных клапанов по сечениям 1-3 и 1-5 несущественны.



Рисунок 2.14 – Эмпирическая и выровненная кривые распределения ширины фасок седел перепускных клапанов по первому сечению



Рисунок 2.15 – Эмпирическая и выровненная кривые распределения ширины фасок седел перепускных клапанов по пятому сечению

Максимальное значение ширины фасок седел согласно критерию Стьюдента не имеет строго определенного места в корпусе клапанного устройства и располагается по периметру седел как случайное событие.

Подобные результаты получены и при использовании критерия Фишера и рангового критерия Ван-дер-Вардена. Проверка по всем трем критериям указывает на случайность расхождений между значениями ширины фасок по сечениям 1, 3 и 5.

Аналогичные выводы были получены и для седел предохранительных клапанов. Конструктивные особенности клапанов не вызывают эксцентриситета в каком-либо направлении при износе.

Таблица 2.12 - Значение статистических параметров для ширины фасок седел перепускных клапанов по 1, 3 и 5 сечениям

| Номер сече-<br>ния | М <sub>0</sub> ,<br>мкм | М <sub>Е</sub> ,<br>мкм | —<br>Х,<br>МКМ | σ <sub>x,</sub><br>мкм <sup>2</sup> | D <sub>x</sub> |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|
| 1                  | 327                     | 330                     | 335            | 165                                 | 27215          |
| 3                  | 339                     | 343                     | 350            | 188                                 | 36682          |
| 6                  | 350                     | 353                     | 358            | 187                                 | 35016          |

### 2.2.3 Определение статистических параметров максимальных значений износа деталей клапанов

При изнашивании деталей предохранительных и перепускных клапанов гидравлических систем автоматизации и управления происходит неравномерный по периметру сопряжений износ. Чтобы полностью при ремонте клапанов вывести следы износа, необходимо при механической обработке удалить слой материала, величина которого определяется максимальным значением износа по периметру детали.

В процессе микрометрирования измеряются ширина фаски седла предохранительного клапана, ширина фаски седла перепускного клапана, глубина износной канавки на перепускном клапане и ширина износной канавки на перепускном клапане и данные заносятся в микрометражные карты.

По микрометражным картам перепускных и предохранительных клапанов выбирается необходимое значение износа из восьми сечений для каждой конкретной детали. По максимальным значениям износа строятся эмпирические кривые распределения и вычисляются статистические параметры. Определение статистических параметров износа проводится только для ремонтнопригодных деталей: седел перепускных и предохранительных клапанов и перепускных клапанов.

Значения статистических параметров максимальных значений износа перепускных и предохранительных клапанов приведены в таблице 2.13. Вы-

равнивание эмпирических распределений по гипотетическим теоретическим производится по закону модуля разности со смещенным центром группирования исходного распределения по закону Гаусса по формуле (2.1).

Таблица 2.13 - Статистические характеристики максимальных значений износа деталей перепускных и предохранительных клапанов

| Наименование износа                                     | М <sub>0</sub> ,<br>мкм | М <sub>Е</sub> ,<br>мкм | -<br>Х,<br>МКМ | σ <sub>x,</sub><br>мкм <sup>2</sup> | D <sub>x</sub> |
|---|-------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|
| 1   | 2                       | 3                       | 4              | 5                                   | 6              |
| Ширина фаски седла предохранительного клапана           | 459                     | 458                     | 472            | 234                                 | 55063          |
| Ширина фаски седла                                      | <i>A</i> 13             | 392                     | 412            | 190                                 | _              |
| Глубина износной ка-<br>навки на перепускном<br>клапане | 94                      | 146                     | 158            | 104                                 | 10897          |
| Ширина износной ка-<br>навки на перепускном<br>клапане  | 559                     | 646                     | 745            | 448                                 | 20105          |

#### **З** ОСНОВЫ ТЕОРИИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ, СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

3.1 Основы теории и совершенствование пузырькового метода и устройств испытаний изделий на герметичность

### 3.1.1 Базовый пузырьковый метод с камерным способом реализации испытаний изделий на герметичность

Схема базового устройства испытаний изделий на герметичность газом пузырьковым методом с камерным способом реализации приведена на рисунке 3.1 и содержит изделие 1, пузырьковую камеру 2 с прозрачной стенкой, источник пробного газа (сжатого воздуха) 4 и вентили 5 и 6. Пузырьковая камера 2 частично заполнена жидкостью, в которую погружена барботажная трубка 3.

Испытания на герметичность изделий с использованием пузырьковой камеры проводятся следующим образом. Вначале открывают вентили 5 и 6 и заполняют изделие 1, пузырьковую камеру 2 с барботажной трубкой 3 пробным газом от источника газа 4. Закрывают вентиль 6 и по количеству пузырьков пробного газа, проходящих через жидкость пузырьковой камеры, делают заключение о герметичности изделия.



Рисунок 3.1 - Схема устройства испытания на герметичность изделий газом с использованием пузырьковой камеры

#### 3.1.2 Математическое описание статических характеристик устройств пузырькового камерного способа испытаний изделий на герметичность

3.1.2.1 Влияние диаметра барботажной трубки пузырьковой камеры на потери давления на трение при движении в ней жидкости

В процессе заполнения устройства, содержащего пузырьковую камеру и изделие, испытываемое на герметичность сжатым воздухом, жидкость в барботажной трубке 3 (рисунок 3.1) устанавливается на уровень жидкости в корпусе пузырьковой камеры 2. При испытаниях на герметичность изделия уровень жидкости в барботажной трубке снижается до нижнего среза.

При движении жидкости в барботажной трубке до нижнего среза происходят потери давления на трения жидкости о стенки трубки. Для круглого трубопровода при ламинарном течении жидкости потери на трение  $\Delta P_{mp}$ , Па, опре-

деляются по формуле [61]  $\Delta P_{mp} = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{U^2}{2g} \cdot \gamma$ . Чтобы по этой формуле выразить потери на трение  $\Delta P_{mp}$  в Па, необходимо использовать соотношение  $\gamma = \rho g$ , в котором  $\rho$  - плотность жидкости кг/м<sup>3</sup>, а g – ускорение земного тяготения м/c<sup>2</sup>. Тогда получим, что

$$\Delta P_{mp} = \frac{1}{2} \lambda \frac{L}{d} \cdot U^2 \rho \,, \tag{3.1}$$

где *d*, *L* – диаметр барботажной трубки и длина ее части, которая заполняется жидкостью, считая от нижнего среза, м;

*U* – скорость перемещения жидкости в трубке, м/с;

 $\lambda$  - коэффициент сопротивления трения.

Перемещение жидкости в барботажной трубке происходит с малой скоростью, а поэтому течение жидкости принимается ламинарным (при малом диаметре трубки). Расчетное значение коэффициента сопротивления трения для ламинарного течения (при Re < 2300) вычисляется по формуле [61]

$$\lambda = 64/\mathrm{Re} = 64\nu/Ud \ ,$$

где Re-численное значение критерия Рейнольдса;

V - кинематический коэффициент вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с.

Формула (3.1) с учетом выражения для коэффициента сопротивления трения принимает вид

$$\Delta P_{mp} = 32 \nu L U \rho / d^2 \,. \tag{3.2}$$
Если плотность воды  $\rho = 998 \text{ кг/m}^3$  [62]; кинематический коэффициент вязкости воды  $\nu =1,007 \text{ сст} = 1,007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{c}$  [62]; скорость перемещения жидкости в барботажной трубке  $U = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м/c}$ ; длина столба жидкости, перемещаемого в барботажной трубке,  $L=15 \cdot 10^{-3}$  м, тогда из формулы (3.2) получим выражение  $\Delta P_{mp} = 0,492 \cdot 10^{-6}/d^2$ , Па, в котором *d*-диаметр барботажной трубки, м. По этому выражению определено, что потери давления интенсивно изменяются в интервале диаметров трубки от 0,2 до 1,0 мм. В этом интервале диаметров трубки потери давления уменьшаются почти в 25 раз, а в интервалах диаметров трубок от 1,0 до 2,0 мм и от 2,0 до 3,0 мм потери давления на трение уменьшаются в 4 и в 2,4 раза.

3.1.2.2 Изменение лапласовского давления от сил поверхностного натяжения жидкости на срезе барботажной трубки в зависимости от ее диаметра

Формирование пузырьков сжатого воздуха на срезе барботажной трубки в устройстве испытаний на герметичность изделий зависит от поверхностного натяжения жидкости. Для определения давления, которое необходимо создать внутри барботажной трубки при формировании пузырька сжатого воздуха, преодолевая силы поверхностного натяжения жидкости, можно воспользоваться формулой Лапласа [63, 64]

$$\Delta P_n = 2 \cdot \sigma / R, \qquad (3.3)$$

где  $\Delta P_{\pi}$  - потери давления в барботажной трубке на преодоление сил поверхностного натяжения жидкости, Па;

σ - поверхностное натяжение жидкости, Н/м;

*R* – внутренний радиус барботажной трубки, м.

Если радиус *R* выразить через диаметр *d*, м, барботажной трубки, тогда формула (3.3) принимает вид

$$\Delta P_n = 4\sigma/d . \tag{3.4}$$

Сравнивая потери давления, связанные с преодолением сил поверхностного натяжения жидкости в барботажной трубке, с потерями давления на трение при движении жидкости в барботажной трубке видно, что первые потери давления почти в 100 раз больше для одного и того же диаметра барботажной трубки при скорости жидкости в трубке, соответствующей герметичности затворов трубопроводной арматуры классов *A* или *B*.

Кроме этого, сопоставление потерь давления, связанных с преодолением сил поверхностного натяжения жидкости в барботажной трубке, с потерями давления на трение при движении жидкости в барботажной трубке, можно провести по соотношению этих потерь по (3.2) и (3.4), а именно:

 $\Delta P_n / \Delta P_{mp} = 4\sigma \cdot d / 32 \nu L U \rho = 4\sigma / [32 \nu U \rho \cdot (L/d)].$  Если скорость  $U \rightarrow 0$ , тогда  $\Delta P_n / \Delta P_{mp} >> 1.$ 

3.1.2.3 Потери давления на формирование пузырьков сжатого воздуха на срезе барботажной трубки

Более полное представление о потере давления на формирование пузырьков сжатого воздуха на срезе барботажной трубки устройства при испытаниях на герметичность изделий получим, рассмотрев затраты работы (энергии) на формирование пузырька сжатого воздуха.

Для упрощения анализа формирования пузырька сжатого воздуха в жидкости использованы данные работы [64], в которой рассмотрены процессы, происходящие при погружении полусферы в жидкость. Кроме этого, не учитывается работа вязких сил в жидкости на формирование пузырьков сжатого воздуха. Правомерность такого допущения подтверждается тем, что, согласно экспериментальным наблюдениям, пузырек сжатого воздуха формируется на нижнем срезе барботажной трубки как на основании, выдувается из этого основания и, достигая определенных размеров, отрывается от среза. До отрыва от барботажной трубки пузырек медленно увеличивается вначале как полусфера, а в момент отрыва от трубки мгновенно формируется в виде сферического пузырька.

На рисунке 3.2 приведена схема постепенного погружения воздушной полусферы радиусом *R* в жидкость.

Работа  $A_1$ , Н·м, затрачиваемая на перемещение некоторого объема газа из области с давлением  $P_2$  в область с давлением  $P_1$  определяется по формуле [64]

$$A_1 = (P_1 - P_2)V_n, (3.5)$$

где *P*<sub>1</sub>, *P*<sub>2</sub> – давление в жидкости и в воздухе над жидкостью, Па;

 $V_n$  – объем полусферы, погружаемой в жидкость, м<sup>3</sup>.

Объем полусферы радиусом  $R V_n = 2/3\pi R^3$  и соотношение (3.5) принимает вид

$$A_1 = 2\pi R^3 (P_1 - P_2)/3.$$
(3.6)



Рисунок 3.2 - Схема постепенного погружения газовой полусферы в жидкость

Работа  $A_2$ , Н·м, затрачиваемая на преодоление сил поверхностного натяжения жидкости при погружении в нее газовой полусферы составляет [64]

$$A_2 = \sigma \cdot \Delta S, \qquad (3.7)$$

где  $\Delta S$  - изменение площади поверхности сферы, смачиваемой жидкостью, м<sup>2</sup>, при погружении в жидкость, которая определяется по соотношению

$$\Delta S = S_2 - S_1, \tag{3.8}$$

где  $S_{l}$  – площадь поверхности по плоскости полусферы, м<sup>2</sup>,

$$S_1 = \pi R^2 \,; \tag{3.9}$$

 $S_2$  – боковая площадь поверхности полусферы, погруженной в жид-кость, м<sup>2</sup>, определяется по формуле [62]

$$S_2 = 2\pi R^2$$
. (3.10)

После совместного решения выражений (3.7)-(3.10) получим

$$A_2 = \pi \cdot \sigma \cdot R^2. \tag{3.11}$$

При погружении газовой полусферы в жидкость затрачивается работа не только на преодоление сил поверхностного натяжения, но и на преодоление выталкивающих сил Архимеда. Если полусфера погружена в жидкость на глубину y (рисунок 3.2), тогда объем V(y) части сферы, находящейся в жидкости,

определяется по формуле [64]

$$V(y) = \frac{1}{3}\pi y^2 (3R - y).$$
 (3.12)

На эту часть сферы действует выталкивающая сила *F(y)*, H, Архимеда, равная весу вытесняемой жидкости

$$F(y) = \rho \cdot g \cdot V(y), \qquad (3.13)$$

где  $\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

g – ускорение силы тяжести, м/ $c^2$ .

Если газовую полусферу дополнительно погрузить в жидкость на глубину dy, считая изменение силы F(y) на малом участке dy неизменной, тогда элементарная работа  $A_3$ , H·м, по погружению полусферы составит

$$dA_3 = F(y)dy = \rho g V(y)dy$$
.

Подставляя в это уравнение (3.12) и интегрируя в пределах изменения *у* от 0 до *R*, получим [64]

$$A_{3} = \int_{0}^{R} dA_{3} = \int_{0}^{R} \frac{1}{3} \pi \rho g y^{2} (3R - y) dy = \frac{1}{3} \pi \rho g \left[ Ry^{3} - \frac{y^{4}}{4} \right]_{0}^{R} = \frac{1}{4} \pi \rho g R^{4} .$$
(3.14)

Считая, что  $A_1 = A_2 + A_3$  и  $P_1 - P_2 = \Delta P_{\phi n}$ ,

из уравнений (3.5), (3.6), (3.7) и (3.14) получим

$$\Delta P_{\phi n} \cdot \frac{2}{3} \pi R^3 = \pi \sigma R^2 + \frac{1}{4} \pi \rho g R^4 \quad \text{или} \quad \Delta P_{\phi n} = \frac{3}{2} \frac{\sigma}{R} + \frac{3}{8} \rho g R , \qquad (3.15)$$

где  $\Delta P_{\phi n}$  - потери давления (разность давлений), Па, на формирование полусферы пузырька сжатого воздуха на срезе барботажной трубки,

При выводе этой формулы исходили из того, что пузырек формируется диаметром, равным диаметру барботажной трубки, то есть R = d/2. В этом случае (3.15) принимает вид

$$\Delta P_{\phi n} = 3\frac{\sigma}{d} + \frac{3}{16}\rho g d , \qquad (3.16)$$

где *d* – диаметр барботажной трубки, м.

По формуле (3.16) построен график изменения потери давления на формирование пузырьков сжатого воздуха на срезе барботажной трубки в зависимости от ее диаметра, который приведен на рисунке 3.3 (кривая 1).



1-теоретическая кривая; 2 – экспериментальная кривая

Рисунок 3.3 - Изменение потери давления на формирование пузырьков сжатого воздуха на срезе барботажной трубки в зависимости от ее диаметра

Экспериментальные исследования потери давления  $\Delta P_{\phi n}$  на формирование пузырьков сжатого воздуха на срезе барботажной трубки проводились по схеме, приведенной на рисунке 3.4, в зависимости от диаметра отверстия в наконечнике 9, закрепленном на конце барботажной трубки 3. Схема (рисунок 3.4) содержит изделие 1, сосуд 2 с прозрачной стенкой и частично заполненный жидкостью, ресивер 4, тягонапоромер 10 и вентили 5, 7 и 8.

Исследования проводились с использованием наконечников диаметром 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,4; 1,6 и 2,0 мм в следующей последовательности. Открывают вентили 5 и 7 и все элементы устройства заполняют сжатым воздухом до давления, равного 0,12 МПа, при закрытом вентиле 8. Закрывают вентиль 7, а затем вентиль 5. Разность давления по тягонапоромеру 10 должна быть равной нулю потому, что отсутствуют утечки сжатого воздуха из изделия 1 в атмосферу. Пузырьки сжатого воздуха на срезе наконечника 9 не появляются.



Рисунок 3.4 - Схема измерений потери давления при формировании пузырьков сжатого воздуха на срезе барботажной трубки в зависимости от ее диаметра

Открывают вентиль 8 и дросселируют часть сжатого воздуха из изделия 1 в атмосферу до появления пузырька сжатого воздуха на выходе наконечника 9. В моменты формирования и отрыва пузырька от наконечника 9 берут отсчеты разности давлений по тягонапоромеру 10.

На рисунке 3.3 (кривая 2) приведены результаты экспериментальных исследований перепада давления на срезе барботажной трубки при формировании пузырьков сжатого воздуха. Отличия теоретических потерь давления от экспериментальных связаны, в основном, с тем, что диаметр пузырьков на срезе барботажной трубки (как показывают исследования приведенные ниже) не равен диаметру трубки. Однако, как теоретические, так и экспериментальные данные подтверждают относительно большое значение потери давления на срезе барботажной трубки на формирование пузырьков газа.

3.1.2.4 Влияние диаметра барботажной трубки на размер формируемых пузырьков сжатого воздуха в жидкости пузырьковой камеры

Основной целью исследований влияния диаметра барботажной трубки на нижнем срезе на размер формируемых пузырьков сжатого воздуха является получение данных, позволяющих, совместно с полученными выше результатами исследований потери давления на трение и формирование пузырьков сжатого воздуха, выбирать необходимый диаметр барботажной трубки устройства испытаний.

Экспериментальные исследования влияния диаметра барботажной трубки на размеры формируемых пузырьков сжатого воздуха, в виду трудности непосредственного измерения диаметров пузырьков сжатого воздуха в жидкости пузырьковой камеры, проводились путем измерения объема воздуха, заключенного и переносимого десятью пузырьками, с последующим вычислением по этому объему воздуха диаметров пузырьков сжатого воздуха. На рисунке 3.5 приведена схема измерений объема пузырьков сжатого воздуха, формируемых на нижнем срезе барботажной трубки. Основными составляющими схемы для измерений объема пузырьков являются эталонная емкость 1, пузырьковая камера 2 с барботажной трубкой 3, на срезе которой установлен наконечник 4, измерительная стеклянная трубка 6 с расположенным внутри ее жидкостным поршнем 7. В качестве измерительной трубки использовалась мерная стеклянная трубка на 1 см<sup>3</sup> по ГОСТ 1770-74 [58].



Рисунок 3.5 - Схема измерений объема пузырьков сжатого воздуха, формируемых на нижнем срезе барботажной трубки

Измерение объема пузырьков сжатого воздуха проводилось при диаметре отверстия в наконечнике, равном 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,4; 1,8; 2,2; 3,5 и 5,0 мм. В качестве наконечников с диаметрами отверстий менее 1 мм использовались медицинские иглы. Экспериментальные измерения объема пузырьков проводятся в следующей последовательности. Устанавливают наконечник 4 (рисунок 3.5) с необходимым диаметром отверстия, открывают вентиль 9 и через трубопровод 10 заполняют сжатым воздухом до давления 0,12 МПа эталонную емкость 1.

В измерительную трубку 6 заливают несколько капель жидкости 7, наклоняют ее в сторону трубопровода 5 в результате чего капли жидкости смещаются к началу (правому концу на рисунке 3.5) трубки. Закрывают вентиль 9 и открывают вентиль 8 (с игольчатым затвором, позволяющим плавно изменять малые расходы сжатого воздуха) до появления выхода и движения пузырьков воздуха из отверстия наконечника 4 в жидкость.

После начала равномерного появления и движения пузырьков сжатого воздуха в жидкости пузырьковой камеры берут начальный отсчет по измерительной трубке и ведут подсчет выходящих из наконечника пузырьков воздуха. После формирования и отрыва десятого пузырька воздуха берется второй отсчет по измерительной трубке.

Разность отсчетов по измерительной трубке заносят в журнал и опыт проводят с трехкратной повторностью. После этого устанавливают наконечник с другим диаметром отверстия и опыты повторяют. Результаты экспериментальных измерений объема пузырьков и вычисленные по этим данным диаметры пузырьков сжатого воздуха, формируемых на срезе барботажной трубки, приведены на рисунке 3.6 (кривая 1).

Теоретический анализ влияния диаметра барботажной трубки на размер формируемых пузырьков сжатого воздуха проведен двумя способами в следующей последовательности.

На пузырек сжатого воздуха, формируемый на срезе барботажной трубки, действует подъемная сила Архимеда и выталкивающая из трубки сила от перепада давления, а удерживает пузырек сжатого воздуха на срезе барботажной трубки сила поверхностного натяжения. Подъемная сила Архимеда, выталкивающая пузырек воздуха вверх,  $F_a$ , H,

$$F_a = \rho g V_n, \tag{3.17}$$

где  $\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

 $V_n$  – объем пузырька сжатого воздуха, м<sup>3</sup>,  $V_n = 1/6 \pi D_n^3$ , в котором  $D_n$  – диаметр пузырька сжатого воздуха, отрывающегося от нижнего среза барботажной трубки, м.

Сила  $F_P$ , H, от перепада давлений на пузырьке  $\Delta P_{dn}$ , выталкивающая пузырек сжатого воздуха из трубки,

$$F_P = \left(\pi d^2/4\right) \Delta P_{\phi n} \,. \tag{3.18}$$

Сила поверхностного натяжения жидкости  $F_{\mu}$ , H, удерживающая пузырек сжатого воздуха на срезе барботажной трубки [64],

$$F_{\mu} = \sigma \cdot l \,, \tag{3.19}$$

где *l* - длина границы соприкосновения пузырька сжатого воздуха с барботажной трубкой, м, определяемая по соотношению

$$l = \pi d . \tag{3.20}$$

Приравнивая значения сил, определяемых по формулам (3.17), (3.18) и (3.19) с учетом выражения (3.20), учитывая, что сумма сил  $F_a$  и  $F_p$  должно быть большей, чем  $F_{H}$ , получим, что диаметр пузырьков сжатого воздуха  $D_n$ , м, формируемых на срезе барботажной трубки, определяется по формуле

$$D_{n1} = \sqrt[3]{\frac{3\sigma d}{2\rho g} - \frac{9}{32}d^3}.$$
 (3.21)

Однако, сумма сил  $F_a$  и  $F_P$ , определяемая по формулам (3.17) и (3.18), является реальной для случая, когда пузырек сжатого воздуха формируется и отрывается выше (а не ниже) среза барботажной трубки. Формула (3.21) описывает диаметр пузырька газа, отрывающегося от верхней поверхности испытываемого на герметичность изделия, например, теплообменника под давлением пробного газа, погруженного в жидкость.

Фактически же барботажная трубка опущена срезом вниз в жидкость пузырьковой камеры и пузырек воздуха формируется и находится под срезом барботажной трубки. Это аналогично пузырьку, расположенному под изделием, находящемся в ванне с жидкостью.

Поэтому, если пузырек сжатого воздуха будет иметь диаметр меньший или равный диаметру барботажной трубки, тогда подъемная сила будет прижимать пузырек к срезу барботажной трубки, а не отрывать от нее. В этом случае эффективный объем  $V_{3\phi}$ , м<sup>3</sup>, пузырька, который создает подъемную силу, можно определить по выражению

$$V_{g\phi} = V_n - V_{nm} = \frac{1}{6}\pi (D^3 - d^3), \qquad (3.22)$$

где  $V_{nm}$  – объем пузырька, м<sup>3</sup>, диаметр которого равен диаметру барботажной трубки, м.

Приравнивая значения сил, определяемых по формулам (3.17), (3.18) и (3.19) с учетом выражения (3.22) и того, что  $F_a + F_P \ge F_n$ , получим

$$D_{n2} = \sqrt[3]{\frac{3\sigma d}{2\rho g} + \frac{23}{32}d^3}.$$
 (3.23)

На рисунке 3.6 приведены значения диаметров пузырьков сжатого воздуха в зависимости от диаметра барботажной трубки, определенные по формулам (3.21) (кривая 2) и (3.23) (кривая 3).

Из сравнения этих кривых видно, что для пузырьков сжатого воздуха размерами до 2,0 мм решающее влияние на их размер оказывают силы поверхностного натяжения жидкости, а для пузырьков сжатого воздуха, диаметр которых выше 2,0 мм, существенное влияние оказывают геометрические размеры пузырьков и ориентация барботажной трубки в пузырьковой камере.

Полученные результаты указывает на достаточную сходимость экспериментальных и теоретических значений диаметров пузырьков сжатого воздуха, формируемых в жидкости пузырьковой камеры, в зависимости от диаметра барботажной трубки, а также на то, что сформировать в пузырьковой камере устройства для испытаний на герметичность изделий пузырьки диаметром менее 1,3 мм не представляется возможным.



Рисунок 3.6 – Экспериментальная (кривая 1) и теоретические (кривые 2 и 3) зависимости диаметров пузырьков сжатого воздуха, формируемых в жидкости пузырьковой камеры, от диаметра барботажной трубки: кривая 2 построена по формуле (3.21), а кривая 3 – по формуле (3.23)

3.1.2.5 Влияние типа жидкости в пузырьковой камере на размер формируемых пузырьков сжатого воздуха

В качестве жидкости, находящейся в пузырьковой камере устройства для испытаний на герметичность изделий, использовались кроме воды также керосин ( $\rho$ =830 кг/м<sup>3</sup> и  $\sigma$  =28,9 · 10<sup>-3</sup> H/м [62]) и этиловый эфир ( $\rho$  = 713 кг/м<sup>3</sup> [62],  $\sigma$  = 16,5 · 10<sup>-3</sup> H/м [62]).

На рисунке 3.7 приведены графики изменения диаметра пузырьков сжатого воздуха, формируемых на выходе барботажной трубки, в зависимости от диаметра трубки для различных типов жидкости в пузырьковой камере: воды (кривая 1), керосина (кривая 2) и этилового эфира (кривая 3).





Рисунок 3.7 - Изменение диаметра пузырьков сжатого воздуха, формируемых на выходе барботажной трубки, в зависимости от диаметра трубки и типа рабочей жидкости в пузырьковой камере

Использование полученных результатов для выбора диаметра барботажной трубки и типа жидкости в пузырьковой камере рассмотрено (таблица 3.1) на примере затворов трубопроводной арматуры DN=250 мм в соответствии с ГОСТ 9544-93 [6] с учетом классов герметичности затворов, погрешностей измерения утечек для каждого класса герметичности и продолжительности испытаний.

|       | Табл  | ица 3.1 | - Вы | бор диаметр | ра б | арботажн | юй тру | бки и тип | а жидкост | и в пу- |
|-------|-------|---------|------|-------------|------|----------|--------|-----------|-----------|---------|
| зырьк | совой | камере  | для  | испытаний   | на   | герметич | чность | затворов  | трубопро  | водной  |
| армат | уры I | DN = 25 | 0 мм |             |      |          |        |           |           |         |

| Класс герме- | Максимально              | Погреш-              | Использование пузырьковой |       |                      |  |
|--------------|--------------------------|----------------------|---------------------------|-------|----------------------|--|
| тичности за- | допустимые               | ность из-            | камеры                    |       |                      |  |
| творов тру-  | утечки по                | мерений              |                           | Диа-  |                      |  |
| бопроводной  | ГОСТ9544-93              | утечек не            | Жидкость                  | метр  | Погреш-              |  |
| арматуры     | [6] для воздуха          | должна               |                           | труб- | ность                |  |
|              | и DN=250 мм              | превышать            |                           | ки    |                      |  |
| Α            | Нет видимых              | ±0,01                | Этило-                    | 1 мм  | $\pm 0,008$          |  |
|              | протечек                 | см <sup>3</sup> /мин | вый эфир                  |       | см <sup>3</sup> /мин |  |
| В            | 4,5 см <sup>3</sup> /мин | ±5 %                 | Вода                      | 4 мм  | ±2,9 %               |  |
| C            | 45 см <sup>3</sup> /мин  | ±5 %                 | Вода                      | 4 мм  | ±0,29 %              |  |
| D            | 450 см <sup>3</sup> /мин | ±5 %                 | Вода                      | 4 мм  | ±0,03 %              |  |

## 3.1.3 Математическое описание динамических свойств устройств пузырькового камерного способа испытаний изделий на герметичность

3.1.3.1 Модель устройства, содержащего пузырьковую камеру и герметичное изделие

Схема устройства для испытаний на герметичность, состоящего из пузырьковой камеры и герметичного изделия, представлена на рисунке 3.8а в виде модели, которая содержит дроссель 2 и последовательно соединенную с ним емкость 1. Дроссель применительно к конструкции пузырьковой камеры выполнен в виде барботажной трубки малого диаметра, погруженного в жидкость. Потери давления  $\Delta P$ , Па, в барботажной трубке при движении сжатого воздуха можно описать формулой (3.2) в следующем виде

$$\Delta P = 32 \frac{L \cdot v \cdot U \cdot \rho}{d_{\delta}^2}, \qquad (3.24)$$

где *L* – длина барботажной трубки (дросселя), м ;

v – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с;

U - скорость движения сжатого воздуха через дроссель, м/с;

 $d_{\partial}$  – диаметр проходного сечения дросселя, м.



Рисунок 3.8 – Расчетные схемы моделей измерительных устройств с использованием пузырьковой камеры

Заменяя скорость движения сжатого воздуха через дроссель выражением,

$$U = Q_1 / f_{\partial} , \qquad (3.25)$$

где  $Q_1$  – расход сжатого воздуха через дроссель, м<sup>3</sup>/с;  $f_{\partial}$  – площадь проходного сечения дросселя, м<sup>2</sup>, причем

$$f_{\partial} = \pi d_{\partial}^2 / 4 \,, \tag{3.26}$$

после подстановки (3.25) и (3.26) в (3.24), получим

$$\Delta P = \frac{128 \cdot v \cdot L \cdot Q_1 \cdot \rho}{\pi \cdot d_0^4}.$$
(3.27)

Потери давления в пузырьковой камере могут быть определенны по формуле (3.27), (3.4) или (3.16) и выбирать при расчетах необходимо большее из полученных значений.

Принимая, как это рекомендуется в работе [65], что перепад давления  $\Delta P$ , Па, соответствует электрическому напряжению, а силе тока соответствует массовый расход сжатого воздуха G<sub>1</sub>, кг/с, который определяется по выражению

$$G_1 = Q_1 \cdot \rho , \qquad (3.28)$$

из формулы (3.27) получим, что гидравлическое сопротивление  $R_{2l}$ , Па·с/кг,

$$R_{21} = \frac{\Delta P}{Q_1 \cdot \rho} = \frac{128 \cdot v \cdot L}{\pi \cdot d_{\phi}^2}.$$
(3.29)

Так как для дросселя  $\Delta P = P_1 - P_2$  (рисунок 3.8а), тогда выражение (3.29) с учетом (3.28) принимает вид

$$P_1 - P_2 = R_{21}G_1 , \qquad (3.30)$$

где  $P_1$ ,  $P_2$  – давление сжатого воздуха до и после дросселя, Па. Для изделия 1 (рисунок 3.8) уравнение политропы имеет вид [65, 66]

$$P_2 v_2^n = const$$
 или  $P_2 v_2^n = Z$ , (3.31)

где  $P_2$  – давление в изделии, Па;

 $v_2$  – удельный объем, м<sup>3</sup>/кг, пробного газа в изделии  $v_2 = V_2/m$  или

$$m = V_2 / v_2$$
, (3.32)

где  $V_2$  – объем изделия, м<sup>3</sup>;

*m* – масса пробного газа в изделии, кг;

n – показатель политропы, значение которого зависит от природы газа и находится в пределах [65] между n = 1 (изотермический процесс) и n = 1,4 (адиабатический процесс). Для адиабатического процесса n = k, где k – показатель адиабаты и для воздуха k = 1,4.

Допустим, что за время dt давление газа в изделии изменилось

$$P_2' = P_2 + dP_2 \tag{3.33}$$

за счет поступления дополнительной массы газа *dm*. Общая масса газа в изделии составит

$$m' = m + dm \,. \tag{3.34}$$

Изменение массы газа на dm, кг, зависит от удельного объема газа V, м<sup>3</sup>/кг, времени dt, с, и объемного расхода газа Q, м<sup>3</sup>/с,

$$dm = Q_1 \cdot dt / v_2 \,. \tag{3.35}$$

При изменении массы газа на dm в изделии удельный объем его  $v_2'$  составит

$$v'_2 = V_2/(m+dm)$$
. (3.36)

Формула (3.31) для измененных значений давления и удельного объема газа принимает вид

$$P_{2}^{'} \cdot (v_{2}^{'})^{n} = Z . \tag{3.37}$$

Из формулы (3.33) определяем, что  $dP_2 = P_2' - P_2$  и с учетом формул (3.31) и (3.37)

$$dP_2 = Z \left[ \frac{1}{(v_2)^n} - \frac{1}{v_2^n} \right].$$

Заменяя в этом выражении удельные объемы из формул (3.32) и (3.36), получим

$$dP_2 = \frac{Z \cdot m^n}{\left(V_1\right)^n} \cdot \left\lfloor \left(1 + \frac{dm}{m}\right)^n - 1 \right\rfloor.$$

Это выражение с учетом формулы (3.35) принимает вид [65]

$$dP_2 = \frac{Z}{V_1^n} \cdot \left[ \left( 1 + \frac{1}{m} \cdot \frac{Q_1}{v_2} \cdot dt \right)^n - 1 \right].$$

Разлагая выражение в скобках в ряд и пренебрегая членами, имеющими порядок выше первого, получим [65]

$$dP_2 = \frac{Z}{V^n} \cdot \frac{n}{m} \cdot \frac{Q_1}{v_2} \cdot dt .$$
(3.38)

Так как согласно формулам (3.31), (3.32) и (3.28)  $Z/v_2^n = P_2$ ,  $m \cdot v_2 = V_2$  и  $Q_1 \cdot \rho = G_1$ , получим для  $dP_2$  из соотношения (3.38)

$$dP_2 = P_2 \frac{n}{\rho V_2} G_1 dt \tag{3.39}$$

(3.40)

или, обозначив  $C_{e2} = \frac{V_2 \rho}{nP_2},$ 

как гидравлическую емкость С<sub>г2</sub>, кг/Па, получим

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{1}{C_{22}} \cdot G_1. \tag{3.41}$$

После преобразования по Лапласу, выражение (3.41) принимает вид

$$sP_2(s) = G_1(s) / C_{22} \tag{3.42}$$

или, опуская для краткости операторы при *P*<sub>2</sub> и *G*<sub>1</sub>, получим [65]

$$sP_2 = G_1 / C_{22}. (3.43)$$

Из (3.43) определяем  $G_1$  и после подстановки (3.30) получим, что  $P_1 - P_2 = R_{21}C_{22}sP_2$  или

$$P_1 = R_{2l}C_{2}sP_2 + P_2. (3.44)$$

Принимая, что постоянная времени [65]

$$\tau = R_{21} \cdot C_{22} \tag{3.45}$$

из (3.44) определяем, что

$$\tau \cdot P_2 \cdot s + P_2 = P_1 \tag{3.46}$$

или после определения оригинала функции, получим

$$\tau \cdot dP_2 / dt + P_2 = P_1. \tag{3.47}$$

Из этого выражения следует, что последовательно соединенные пузырьковая камера и герметичное изделие представляют собой апериодическое звено первого порядка, переходной процесс для которого описывается экспонентой

$$P_2 = P_{10} \left( 1 - e^{-t/\tau} \right), \tag{3.48}$$

где  $P_{10}$  – установившееся значение давления сжатого воздуха до пузырьковой камеры с гидравлическим сопротивлением  $R_{21}$ , Па.

Структурная схема модели устройства, состоящего из герметичного изделия и пузырьковой камеры, в соответствии с (3.46) приведена на рисунке 3.9.

Время переходного процесса *t*, с, обычно принимают [65]

$$t = 3\tau \tag{3.49}$$

ИЛИ

$$t = 3R_{21}C_{22} = 3 \cdot \frac{128\nu L}{\pi d_{\partial}^4} \cdot \frac{V_2\rho}{nP_2}.$$
 (3.50)



Рисунок 3.9 - Структурная схема модели устройства, состоящего из пузырьковой камеры и герметичного изделия

Это соотношение показывает, что время переходного процесса, в основном, тем меньше, чем больше проходной диаметр дросселя, то есть барботажной трубки, и чем меньше объем испытываемого на герметичность изделия.

Для определения численного значения времени переходного процесса формулу (3.50) запишем с учетом формулы (3.29)

$$t = \Delta P V_2 / Q_1 n P_2 , \qquad (3.51)$$

где  $\Delta P$  - потери давления в барботажной трубке, Па.

Принимая, например, для барботажной трубки диаметром 1,0 мм  $\Delta P = 290 \text{ Па}$ , объем испытываемого на герметичность изделия  $V_2 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , давление в изделии  $P_2 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , n = 1,4 и расход сжатого воздуха через барботажную трубку, равным одному пузырьку диаметром 3,5 мм в секунду, что соответствует расходу  $Q_1 = 22,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$ , определяем, что время переходного процесса t = 383,6 с.

Полученное время переходного процесса не удовлетворяет практику, поэтому при подготовке устройства к работе при снижении уровня жидкости в барботажной трубке до нижнего уровня путем дросселирования необходимо дросселировать в атмосферу очень малые объемы воздуха, вплоть до нескольких пузырьков сжатого воздуха. Допустим, что переходной процесс должен закончиться в течение 5 с, то есть t = 5 с, тогда из формулы (3.51) определяем, что  $V_2 = t_1 Q_1 n P / \Delta P = 6,52 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 = 65,2 \text{ см}^3$ . Если принять, что объем изделия  $V_2 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  составляет 100 %, тогда принятый выше объем, равный 6,52 \cdot 10^{-5} m<sup>3</sup>, составляет 1,3 %. Таким образом, при дросселировании сжатого воздуха из изделия при снижении уровня жидкости в барботажной трубке до нижнего среза выпуск воздуха не должен превышать 0,1–1,0 % от объема изделия.

3.1.3.2 Модель устройства, содержащего пузырьковую камеру и изделие с микрощелью

Схема модели устройства, состоящего из пузырьковой камеры и изделия с микрощелью, приведена на рисунке 3.86, на которой барботажная трубка пузырьковой камеры заменена дросселем 2, а микрощель изделия 1 дросселем 3. Эта модель по динамике явлений, протекающих в ней, может быть разделена на две части. Первая часть состоит из дросселя 2 и изделия 1 и рассмотрена в предыдущем подпункте, а вторая часть состоит из изделия 1 и дросселя 3.

Истечение сжатого воздуха из изделия 1 (рисунок 3.86) в атмосферу через дроссель 3 может быть описано уравнением, подобным (3.41), учитывая, что воздух из изделия выходит в атмосферу и давление в изделии понижается,

$$dP_2/dt = -G_2/C_{22}, (3.52)$$

где  $dP_2/dt$  - изменение давления в изделии, Па/с;

 $G_2$  - массовый расход сжатого воздуха из изделия, кг/с;

 $C_{22}$  - гидравлическая емкость изделия, кг/Па, которая может быть определена по формуле (3.40)

$$C_{22} = V_2 \cdot \rho / n \cdot P_2 \,. \tag{3.53}$$

Расход сжатого воздуха  $G_2$  через дроссель 3 определяется по формуле, подобной (3.30),

$$G_2 = (P_2 - P_3)/R_{22}, \qquad (3.54)$$

где *P*<sub>2</sub>, *P*<sub>3</sub> - давление газа в изделии и после дросселя 3, Па;

 $R_{22}$  - гидравлическое сопротивление дросселя 3, Па·с/кг. После подстановки (3.54) в (3.52) получим

$$\frac{dP_2}{dt} = -\frac{1}{C_{e2}} \cdot \frac{P_2 - P_3}{R_{e2}} = -\frac{1}{\tau_2} \cdot (P_2 - P_3), \qquad (3.55)$$

где  $\tau_2$  - постоянная времени устройства, с,  $\tau_2 = R_{22} \cdot C_{22}$ . Преобразовав по Лапласу (3.55), получим

$$P_2(s)(\tau_2 s + 1) = P_3(s), \qquad (3.56)$$

где *s* – оператор Лапласа.

Для анализа работы всего устройства (рисунок 3.8б), состоящего из изделия с микрощелью и пузырьковой камеры с барботажной трубкой, составлена расчетная модель, приведенная на рисунке 3.10. Для устройства по этой схеме уравнения имеют вид, с учетом формул (3.30), (3.54) и (3.55),

$$G_1 = \frac{P_1 - P_2}{R_{21}}, \quad G_2 = \frac{P_2 - P_3}{R_{22}}, \quad G_3 = G_1 - G_2, \quad \frac{dP_2}{dt} = \frac{1}{C_{22}} \cdot G_3.$$
(3.57)



Рисунок 3.10 - Расчетная модель устройства, состоящего из пузырьковой камеры и изделия с микрощелью

Последнее выражение в соотношениях (3.57) после преобразования по Лапласу принимает вид

$$sC_{22} \cdot P_2(s) = G_3(s).$$
 (3.58)

Из (3.58) с учетом (3.57) определяем, что

$$sC_{22} \cdot P_2(s) = \frac{\left[P_1(s) - P_2(s)\right]}{R_{21}} - \frac{\left[P_2(s) - P_3(s)\right]}{R_{22}}.$$
(3.59)

Известно, что при параллельном соединении сопротивлений их проводимости складываются

$$1/R = 1/R_{21} + 1/R_{22}, \qquad (3.60)$$

где R – общее гидравлическое сопротивление дросселей, Па·с/кг, и тогда из формулы (3.59), с учетом выражения (3.60), получим

$$sC_{22}P_{2}(s) = \frac{P_{1}(s)}{R_{21}} - \frac{P_{2}(s)}{R} + \frac{P_{3}(s)}{R_{22}}$$
$$(sC_{22}R + 1)P_{2}(s) = \left[\frac{P_{1}(s)}{R_{21}} + \frac{P_{3}(s)}{R_{22}}\right]R.$$
(3.61)

Если  $P_3 = P_a$  – атмосферному давлению, тогда

$$(sC_{22}R+1)P_{2}(s) = \left[\frac{P_{1}(s)}{R_{21}} + \frac{P_{a}(s)}{R_{22}}\right]R.$$
(3.62)

Структурная схема модели устройства, состоящего из пузырьковой камеры и изделия с микрощелью, составленная по уравнению (3.62), представлена на рисунке 3.11.

Из выражения (3.62) и структурной схемы (рисунок 3.11) следует, что на результаты контроля герметичности изделий устройством с пузырьковой камерой (и на выбор конструктивных параметров пузырьковой камеры) оказывает влияние не только испытательное давление, фактическое давление газа в изделии и атмосферное давление, но и пневматическая емкость изделия, гидравлическое сопротивление пузырьковой камеры и степень герметичности изделия.

или



Рисунок 3.11 – Структурная схема модели устройства, состоящего из пузырьковой камеры и изделия с микрощелью

3.1.3.3 Модель устройства, содержащего эталонную емкость, пузырьковую камеру и изделие с микрощелью

Модель устройства, состоящего из эталонной емкости, пузырьковой камеры и изделия с микрощелью, заполненных сжатым воздухом заданного давления, приведена на рисунке 3.8в, а расчетная модель - на рисунке 3.12.



Рисунок 3.12 – Расчетная модель устройства, состоящего из эталонной емкости, пузырьковой камеры и изделия с микрощелью

Пользуясь схемой, приведенной на рисунке 3.12, и электропневматической аналогией, получим следующую систему уравнений:

$$dP_1/dt = -G_1/C_{21}, (3.63)$$

$$G_1 = (P_1 - P_2)/R_{21}, \qquad (3.64)$$

$$dP_2/dt = G_3/C_{22}, (3.65)$$

$$G_2 = (P_2 - P_3)/R_{22}, \qquad (3.66)$$

$$G_3 = G_1 - G_2, \tag{3.67}$$

где *P*<sub>1</sub>, *P*<sub>2</sub> – давление сжатого воздуха в эталонной емкости 4 и изделии 1 (рисунок 3.12), Па;

 $R_{21}$ ,  $R_{22}$  – гидравлическое сопротивление дросселей 2 и 3, Па·с/кг;

 $C_{2l}$ ,  $C_{22}$  – гидравлическая емкость эталонной емкости 4, которая определяется по аналогии с выражением (3.40) как  $C_{21} = V_1 \rho / nP_1$ , и гидравлическая емкость изделия 1, определяемая по выражению (3.40), кг/Па;

 $G_1, G_2, G_3$  — массовые расходы сжатого воздуха через дроссели 2 и 3 и расход воздуха в изделие за счет изменения в нем давления, кг/с.

Заменив расход  $G_1$  в (3.63) из (3.64), получим

$$\frac{dP_1}{dt} = -\frac{P_1}{C_{z1}R_{z1}} + \frac{P_2}{C_{z1}R_{z1}}.$$
(3.68)

Если  $C_{21}R_{21} = \tau_1$ , тогда (3.68) принимает вид

$$P_2 = (dP/dt) \cdot \tau_1 + P_1.$$
 (3.69)

Из (3.65) с учетом (3.67), (3.66) и (3.64) определяем, что

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{1}{C_{21}} \left[ \frac{P_1}{R_{21}} + \frac{P_3}{R_{22}} - P_2 \left( \frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}} \right) \right].$$
(3.70)

Если взять производную от  $P_1$  и  $P_2$  по dt в уравнении (3.69)

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{d^2 P_1}{dt^2} \cdot \tau_1 + \frac{dP_1}{dt}$$
(3.71)

и приравнять правые части (3.71) и (3.70), тогда, после замены  $P_2$  выражением из (3.69), получим

$$\tau_1 \frac{d^2 P_1}{dt^2} + \frac{dP_1}{dt} \left( 1 + \frac{\tau_1}{RC_{z2}} \right) - P_1 \left( \frac{1}{R_{z1}C_{z2}} - \frac{1}{RC_{z2}} \right) = \frac{P_3}{R_{z2}C_{z2}}, \qquad (3.72)$$
  
где  $1/R = 1/R_{z1} + 1/R_{z2}.$ 

94

После преобразования уравнения (3.72) по Лапласу

$$s^{2}\tau_{1}P_{1}(s) + sP_{1}(s)\left(1 + \frac{\tau_{1}}{C_{c2}R}\right) - P_{1}(s)\left(\frac{1}{R_{c1}C_{c2}} - \frac{1}{RC_{c2}}\right) = \frac{1}{R_{c2}C_{c2}}P_{3}(s) \quad (3.74)$$

определяем передаточную функцию по  $P_3$  от  $P_1$ 

$$W_p(s) = \frac{P_1(s)}{P_3(s)} = \frac{K_{_{9Ny}}}{T_{_{9Ny}}^2 s^2 + 2\xi_{_{9Ny}}T_{_{9Ny}}s + 1},$$
(3.75)

в которой коэффициент преобразования  $K_{_{3ny}} = RC_{_22}R_{_21}/[C_{_22}R_{_22} \cdot (R_{_{21}} - R)]$ , а постоянная времени  $T_{_{3ny}}$ , с, и коэффициент демпфирования  $\xi_{_{3ny}}$  определяются выражениями:

$$T_{3ny} = \sqrt{\frac{C_{21} \cdot C_{22} \cdot R \cdot R_{21}^2}{R_{21} - R}},$$
 (3.76)

$$\xi_{_{9Ny}} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{C_{_{21}}R_{_{21}}}{C_{_{22}}R} \right) \sqrt{\frac{R \cdot C_{_{22}}}{C_{_{21}}(R_{_{21}} - R)}} \,.$$
(3.77)

Выражение (3.77) с учетом расходов газа через пузырьковую камеру  $Q_1$  и микрощель изделия  $Q_2$  можно представить в следующем виде

$$\xi_{3ny} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{V_1 \rho}{nP_1} \left[ 1 + \frac{(P_1 - P_2)Q_2}{(P_2 - P_3)Q_1} \right] \right\} \sqrt{\frac{\frac{V_2 \rho}{nP_2} \left[ 1 + \frac{(P_1 - P_2)Q_2}{(P_2 - P_3)Q_1} \right]}{\frac{Q_1 \rho}{(P_1 - P_2)} + \frac{Q_2 \rho}{(P_2 - P_3)} - \frac{V_2 (P_1 - P_2)}{nP_2 Q_1}}{\frac{N_2 \rho}{(P_2 - P_3)} - \frac{V_2 (P_1 - P_2)}{nP_2 Q_1}} \right]}$$

или через гидравлические емкости эталонной емкости устройства испытаний  $C_1$ , изделия  $C_2$  и гидравлические сопротивления пузырьковой камеры  $R_{21}$  и микрощели в изделии  $R_{22}$ 

$$\xi_{_{3ny}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{R_{_{22}}}{R_{_{21}}} + C_{_{21}} \left( 1 + \frac{R_{_{22}}}{R_{_{21}}} \right) \right] \sqrt{\frac{C_{_{22}}}{C_{_{21}}}} \,.$$
(3.78)

Согласно выражению (3.40)  $C_{c2} = V_2 \rho/nP_2$  и аналогично  $C_{c1} = V_1 \rho/nP_1$ . Если, например, объем эталонной емкости  $V_1 = 0,02 \text{ м}^3$ ; объем изделия  $V_2 = 0,0002 \text{ M}^3$ ;  $\rho = 1,27 \text{ кг/m}^3$ ; n = 1,4;  $P_1 = 0,15 \cdot 10^6 \text{ Па}$ , тогда  $C_{c1} = 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Па}$  и  $C_{c2} = 0,0012 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Па}$ . Гидравлическое сопротивление, согласно выражению (3.29), для пузырьковой камеры  $R_{c1} = 0,228 \text{ Па} \cdot \text{с/кг}$ , а для микрощели с услов-

ным диаметром, равным 0,1 мм,  $R_{22} = 4,105 \text{ Па·с/кг}$ . Коэффициент демпфирования в этом случае  $\xi_{3nv} = 0,902$ .

Если условный диаметр микрощели менее 0,1 мм, тогда ее гидравлическое сопротивление  $R_{22} > 4,105 \text{ Па·с/кг}$  и, как видно из формулы (3.78)  $\xi_{3ny}$  будет больше единицы.

На основании этого можно отметить, что динамическое звено второго порядка с передаточной функцией по выражению (3.75) может быть колебательным звеном (при  $0 < \xi_{any} < 1$ ) или апериодическим звеном второго порядка (при  $\xi_{any} > 1$ ) в зависимости от соотношения объемов изделия и эталонной емкости и от степени герметичности изделия.

Для случаев, когда  $\xi_{_{3ny}} > 1$  знаменатель передаточной функции (3.75) можно разложить на два сомножителя  $(a_1s+1)(b_1s+1)$ , из которых получим, что

$$(a_1s+1)(b_1s+1) = a_1b_1s^2 + (a_1+b_1)s+1, \qquad (3.79)$$

где  $a_1, b_1$  - коэффициенты уравнения.

Сопоставляя уравнение (3.79) и знаменатель передаточной функции (3.75) определяем, что

$$a_{1}b_{1} = \tau_{1} \left( \frac{R \cdot C_{22} \cdot R_{21}}{R_{21} - R} \right),$$
(3.80)

$$(a_{1}+b_{1}) = RR_{2}C_{2}\left(1+\frac{\tau_{1}}{C_{2}R}\right) / (R_{2}-R).$$
(3.81)

После совместного решения этих уравнений устанавливаем, что

$$a_{1} = \frac{k \pm \sqrt{k^{2} - 4(R_{e1} - R)R \cdot R_{e1} \cdot C_{e2}}}{2R \cdot R_{e1} \cdot C_{e2}},$$
(3.82)

$$b_{1} = \frac{2R^{2} \cdot R_{21}^{2} \cdot C_{22}^{2}}{\left(R - R_{21} \cdot C_{22}\right)\left(k \pm \sqrt{k^{2} - 4(R - R_{21} \cdot C_{22})R \cdot R_{21} \cdot C_{22}}\right)},$$
(3.83)

где

$$k = \frac{R \cdot R_{21} \cdot C_{22}}{R_{21} - R} \cdot \left(1 + \frac{\tau_1}{R}\right).$$

Важным представляется получение передаточной функции расхода  $G_1$  через барботажную трубку по отношению к расходу  $G_2$  через микрощель изделия.

Из формулы (3.63) определяем *G*<sub>1</sub>

$$G_1 = -C_{21} \frac{dP_1}{dt},$$
 (3.84)

а из формулы (3.64) -  $P_1 = G_1 \cdot R_{e1} + P_2$ , которое после дифференцирования по времени принимает вид

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{dG_1}{dt}R_{21} + \frac{dP_2}{dt}.$$

Подставив это выражение в формулу (3.84), получим

$$G_1 = -C_{21} \frac{dG_1}{dt} R_{21} - C_{21} \frac{dP_2}{dt}, \qquad (3.85)$$

а затем в (3.85) подставим формулу (3.65) и определим, что

$$G_1 = -C_{21} \frac{dG_1}{dt} R_{21} - \frac{C_{21}}{C_{22}} G_3.$$
(3.86)

Так как в соответствии с выражением (3.67)  $G_3 = G_1 - G_2$ , тогда (3.86) принимает вид

$$C_{z1}R_{z1}\frac{dG_1}{dt} + G_1\left(1 + \frac{C_{z1}}{C_{z2}}\right) = \frac{C_{z1}}{C_{z2}} \cdot G_2.$$
(3.87)

После преобразования по Лапласу определяем передаточную функцию от  $G_1$  по  $G_2$ 

$$W_G(s) = \frac{G_1(s)}{G_2(s)} = \frac{C_{21}/(C_{21} + C_{22})}{T_2 s + 1},$$
(3.88)

где

$$T_2 = \frac{C_{21}C_{22}R_{21}}{C_{21} + C_{22}}.$$
(3.89)

Время  $t_2$ , с, переходного процесса

$$t_2 = 3T_2 = 3R_{21}/(1/C_{21} + 1/C_{22}).$$
(3.90)

Таким образом, передаточная функция расхода сжатого воздуха через пузырьковую камеру  $G_1(s)$  в зависимости от расхода сжатого воздуха через микрощель изделия  $G_2(s)$  представляет собой апериодическое звено первого порядка. Время переходного процесса, согласно выражению (3.90), пропорционально гидравлическому сопротивлению  $R_{cl}$  барботажной трубки с пузырьковой камерой и гидравлическим емкостям  $C_{cl}$  и  $C_{c2}$  эталонной емкости и изделия.

Гидравлическое сопротивление дросселя 2 (рисунок 3.12), представляющего барботажную трубку с пузырьковой камерой, на основании формулы (3.29)  $R_{21} = \Delta P/Q_1 \rho$ . Пневматические емкости эталонной емкости 4 и изделия 1 (рисунок 3.12) в соответствии с формулой (3.53) определяются по следующим соотношениям:  $C_{21} = V_1 \rho/nP_1$  и  $C_{22} = V_2 \rho/nP_2$ . С учетом этих выражений время переходного процесса в соответствии с (3.90) определяется по формуле

$$t_{2} = \frac{3\Delta P}{nQ_{1}\left(\frac{P_{1}}{V_{1}} + \frac{P_{2}}{V_{2}}\right)}.$$
(3.91)

Так как  $\Delta P = P_1 - P_2$ , откуда  $P_2 = P_1 - \Delta P$ , тогда формула (3.91) принимает вид

$$t_{2} = \frac{3\Delta P}{nQ_{1}\left(\frac{P_{1}}{V_{1}} + \frac{(P - \Delta P)}{V_{2}}\right)}.$$
 (3.92)

Результаты вычислений времени переходного процесса по этой формуле приведены на рисунке 3.13, которые свидетельствуют о том, что необходимо не допускать значительных перепадов давления на барботажной трубке в процессе снижения в ней жидкости до нижнего среза потому, что это существенно увеличивает время подготовки устройства к непосредственному измерению герметичности изделия.



кривая 1 -  $Q_I = 31,06 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/с; кривая 2 -  $Q_I = 31,06 \cdot 10^{-10}$  м<sup>3</sup>/с

Рисунок 3.13 - Изменение времени переходного процесса, определяемого по формуле (3.92), в зависимости от перепада давления  $\Delta P$  на барботажной трубке и расхода воздуха через эту трубку  $Q_1$ 

На рисунке 3.14 приведены те же графики, что и на рисунке 3.13, но в других координатах и с указанием зон для трубопроводной арматуры по ГОСТ 9544-93 [6] для DN =250 мм. Внизу рисунка 3.14 указаны интервалы времени переходного процесса по предельным по ГОСТ 9544-93 [6] значениям утечек при испытании воздухом затворов трубопроводной арматуры (DN=250 мм) для различных классов герметичности. Как видно из графиков рисунка 3.14, время переходного процесса при герметичном изделии уходит к бесконечности. При появлении утечек из изделия, время переходного процесса резко снижается и принимает вполне определенное значение.

## **3.1.4** Совершенствование газового пузырькового камерного метода автоматизированного контроля герметичности изделий

3.1.4.1 Совершенствование технологического процесса испытаний изделий на герметичность газовым пузырьковым методом

Разработаны способ и устройство испытаний на герметичность изделий [67] основанные на дифференциальном способе измерений герметичности изделий с использованием пузырьковой камеры. Схема устройства приведена на рисунке 3.15 и содержит изделие 1, проверяемое на герметичность, пузырьковую камеру 2 с прозрачной стенкой, эталонную емкость (ресивер) 4, источник пробного газа (сжатого воздуха) 6, измерительный преобразователь формируемых пузырьков газа 9 и счетчик пузырьков газа 10. Пузырьковая камера 2 частично заполнена жидкостью, в которую погружена барботажная трубка 3.



Рисунок 3.14 - Изменение времени переходного процесса, определяемого по формуле (3.92) в зависимости от перепада давления  $\Delta P$  и расхода сжатого воздуха  $Q_1$  через пузырьковую камеру для классов герметичности трубопроводной арматуры при DN=250 мм

Устройство испытаний на герметичность изделий с использованием пузырьковой камеры работает следующим образом. Вначале изделие 1, пузырьковую камеру 2 с барботажной трубкой 3 и эталонную емкость 4 заполняют одновременно пробным газом. Для этого открывают вентиль 5, соединяя параллельно по входу пробного газа эталонную емкость, пузырьковую камеру и изделие, и подводят к ним от источника 6 пробный газ через вентиль 7.

После заполнения элементов устройства пробным газом до заданного давления соединяются последовательно эталонная емкость 4, пузырьковая камера 2 и изделие 1 путем закрытия вентиля 5. Отключение устройства испытаний от источника пробного газа осуществляют закрытием вентиля 7. Настройка

устройства в исходное состояние осуществляется с помощью вентиля 8. Открывая вентиль 8, дросселируют часть пробного газа из изделия в атмосферу.



Рисунок 3.15 - Схема устройства испытаний на герметичность изделий газом с использованием пузырьковой камеры

После появления пузырьков в жидкости пузырьковой камеры дросселирование пробного газа через вентиль 8 в атмосферу прекращают. Прекращение дросселирования пробного газа в атмосферу при герметичном изделии исключает появление пузырьков в жидкости пузырьковой камеры. В этот момент уровень жидкости в барботажной трубке понижается до нижнего среза и остается на этом уровне. Наличие микротечи в изделии приводит к формированию и движению пузырьков пробного газа через жидкость пузырьковой камеры, которые подсчитываются счетчиком 10.

По количеству пузырьков пробного газа, проходящих через жидкость пузырьковой камеры, и их объему делают заключение о герметичности изделия.

3.1.4.2 Использование гидравлического затвора в устройствах испытаний изделий пузырьковым камерным методом

В устройстве испытаний на герметичность изделий, представленном на рисунке 3.15, вентиль 5 подключен параллельно пузырьковой камере 2. При испытаниях на герметичность изделия 1 вентиль 5 находится в закрытом положении. В процессе эксплуатации вентиль 5 изнашивается и пропускает часть пробного газа, снижая количество пробного газа, проходящего через пу-

зырьковую камеру. Это может привести к тому, что негерметичное изделие не будет выбраковано.

Рассмотрим соотношение возможных расходов пробного газа через микрощели запорного органа (вентиля 5) и через пузырьковую камеру устройства при испытаниях на герметичность изделий на основании данных, приведенных в работах [68].

Принимаем, что диаметр воздушного пузырька, который может появиться в жидкости резервуара в результате выхода пробного газа через неплотности изделия, при погружении его в жидкость под заданным избыточным давлением, составляет 2,5 мм. Объем газа, заключенного в пузырьке этого диаметра,  $V_n = 1/6\pi d^3 = 1/6\pi 2,5^3 = 6,18 \text{ мм}^3$ .

Испытание на герметичность, например, автотракторных теплообменников проводят в течение 30 с. Предельно допустимый максимальный расход газа  $q_{max}$ , мм<sup>3</sup>/с, через неплотность составит  $q_{max} = V_n/t = 6,18/30 = 0,273$  мм<sup>3</sup>/с, где  $V_n$ - объем пробного газа, заключенный в одном пузырьке, мм<sup>3</sup>; *t*-время испытаний изделия на герметичность, с.

Принимаем, что зазор в новом запорном органе, детали которого подогнаны путем совместной притирки,  $\delta = 25 - 50$  мкм [61], а условный проходной диаметр кранового запорного органа  $d_v = 5$  мм.

Расход сжатого воздуха через плоскую щель q, мм<sup>3</sup>/с, определяется по формуле [69]

$$q = \frac{S\delta^3 \Delta P}{12\ \mu \cdot l},\tag{3.93}$$

где  $\delta$  - зазор между стенками плоской щели, мм ( $\delta$  =50 мкм);

S - ширина плоской щели, мм (S = 5 мм);

l - длина щели, мм,  $l = \pi \cdot d_{\kappa p}$ , где  $d_{\kappa p}$ - диаметр затвора крана; при  $d_{\kappa p}$  = 20 мм l = 62,8 мм;

 $\Delta P$  - разность давлений, приложенная к запорному органу при испытаниях на герметичность изделия (принимаем  $\Delta P = 20$  Па);

 $\mu$  - коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с, который определяется по формуле [62]

$$\mu = \mu_0 \cdot \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273}\right)^{3/2}, \qquad (3.94)$$

где C – постоянная величина (для воздуха C = 111 [62]);

T-абсолютная температура воздуха, К, (T = 293 К);

 $\mu_0$ - коэффициент динамической вязкости воздуха при температуре 0 °C, Па·с;  $\mu_0 = 17,12 \cdot 10^{-6}$  Па·с [62]. Тогда  $\mu = 18,093 \cdot 10^{-6}$  Па·с и расходы воз-

духа составят:  $q_{0,050} = 0,916$ ;  $q_{0,025} = 0,115$ , где  $q_{0,050}$ ;  $q_{0,025}$ -расход сжатого воздуха, мм<sup>3</sup>/с, через сопряжения запорного органа с размером зазора, равного 0,050 и 0,025 мм.

Если принять расход сжатого воздуха  $q_{max} = 0,273 \text{ мм}^3/\text{с}$  как сто процентов, тогда  $q_{0,025} = 0,115 \text{ мм}^3/\text{c} = 42,1 \%$ , а  $q_{0,050} = 0,916 \text{ мм}^3/\text{c} = 235,8 \%$ . Таким образом, расход сжатого воздух через сопряжения нового запорного органа при испытаниях на герметичность изделий может составлять от 42,1 до 235,8 % от расхода сжатого воздуха, проходящего через жидкость пузырьковой камеры.

Износ деталей сопряжений запорного органа приводит к еще большему расходу сжатого воздуха. Это позволяет сделать вывод о том, что расход сжатого воздуха через жидкость пузырьковой камеры и запорный орган фактически соизмеримы. Чтобы уменьшить погрешность испытаний изделий на герметичность разработано устройство с использованием пузырьковой камеры и гидравлического затвора [68], схема которого приведена на рисунке 3.16.

Устройство испытаний на герметичность изделий с использованием пузырьковой камеры и гидравлического затвора состоит из эталонной емкости 1, изделия 2, испытываемого на герметичность, гидравлического затвора, содержащего герметичную емкость 3, частично заполненную жидкостью (ртутью или водой), с двумя трубками 4 и 5, барботажной трубки 6 и пузырьковой камеры 7. Трубки 4 и 5 гидравлического затвора, жестко соединенные с барботажной трубкой 6 и корпусом пузырьковой камеры 7, установлены на опоре 8 и поворотном шарнире 9. Одна из этих трубок присоединяется к эталонной емкости, а другая к изделию с помощью гибких трубопроводов 10 и 11.

В гидравлическом затворе отсутствуют рабочие трущиеся поверхности, что практически полностью исключает утечки пробного газа из эталонной емкости и изделия при испытаниях на герметичность. Кроме этого, разработанное устройство позволяет легко автоматизировать процессы испытаний на герметичность изделий.



Рисунок 3.16 - Схема устройства испытаний на герметичность изделий с использованием пузырьковой камеры и гидравлического затвора

3.1.4.3 Выбор геометрических размеров эталонной емкости при испытаниях изделий пузырьковым камерным методом

Оценка влияния геометрических размеров эталонной емкости, присоединенной к пузырьковой камере устройства для испытаний на герметичность изделий, проводится с целью обоснования выбора наиболее рациональных размеров этой емкости (рисунок 3.15).

На точность контроля герметичности изделий устройством с использованием пузырьковой камеры влияет не только объем эталонной емкости  $V_p$ , но и объем изделия  $V_u$ . Оценка влияния геометрических размеров присоединенной к пузырьковой камере эталонной емкости осуществляется по их влиянию на точность контроля герметичности изделий, а именно на относительную погрешность измерения негерметичности изделий для различных значений отношения  $V_u/V_p$ . Для экспериментальных исследований используется лабораторная установка, схема которой приведена на рисунке 3.17.

Установка позволяет одновременно измерять расходы сжатого воздуха, проходящих через жидкость пузырьковой камеры 6 и через жидкость резервуара 12, в которую погружено изделие 13. Определение расхода воздуха осуществляется по измерению количества сжатого воздуха за принятый промежуток времени.

Для измерения количества сжатого воздуха, прошедшего через микрощель изделия и жидкость резервуара 12, используется измерительная трубка 10 с воронкой 11.

Допустим, что через микрощель изделия 13 выходит сжатый воздух в виде пузырьков в жидкости в количестве  $N_{\phi}$  (фактическое число пузырьков сжатого воздуха, выходящих из изделия в жидкость резервуара за принятый промежуток времени). Принимаем, что через жидкость пузырьковой камеры 6 (рисунок 3.17) за тот же промежуток времени проходит количество пузырьков сжатого воздуха  $N_{\delta}$  (число пузырьков сжатого воздуха, проходящих через жидкость пузырьковой камеры за принятый промежуток времени).

При этом считается, что геометрические размеры и объемы пузырьков сжатого воздуха, проходящих через жидкость пузырьковой камеры и через жидкость резервуара от изделия, одинаковы. Практически это достигается путем деления измеренных трубками 8 и 10 объемов на принятый размер (объем) пузырька.

На основании закона Бойля-Мариотта [62] для двух состояний газа в эталонной емкости 1, заполненной сжатым воздухом, получим

$$V_2 = (P_1 / P_2) \cdot V_1, \tag{3.95}$$

где  $V_1$ ,  $V_2$  – объем сжатого воздуха в эталонной емкости при абсолютном давлении, равном  $P_1$  и  $P_2$  Па, м<sup>3</sup>;



Рисунок 3.17 - Схема установки для исследования влияния соотношения объемов эталонной емкости и изделия на погрешность контроля герметичности изделий устройством с использованием пузырьковой камеры

Если принять, что  $P_1 = 0,1$  МПа, а  $P_2 = 0,2$  МПа, тогда  $V_2 = 0,5V_1$ , м<sup>3</sup>. То есть, при сжатии, например, воздуха на 0,1 МПа в эталонной емкости его объем будет в два раза меньше прежнего.

Допустим, что при испытаниях изделия 13 (рисунок 3.17) снижение давления сжатого воздуха в эталонной емкости 1 и изделии происходит от давления 0,1 МПа до нуля, то есть сжатый воздух полностью выходит из эталонной емкости и изделия.

В этом случае через микрощель в изделии пройдет сжатый воздух в объеме, равном сумме изменений объемов воздуха в изделии и эталонной емкости  $(V_u + V_p)$  (пренебрегая в виду малости объемами пузырьковой камеры и присоединительных трубопроводов), а через пузырьковую камеру пройдет воздух из эталонной емкости в объеме  $V_p$ . На основании условия о равенстве объемов пузырьков воздуха, выходящих через жидкость пузырьковой камеры и через жидкость резервуара 12, можно записать соотношение  $V_p/N_{\delta} = (V_p + V_u)/N_{\phi}$ . Из этого выражения получим

$$N_{\phi} = N_{\delta} \cdot \frac{V_p + V_u}{V_p}; \qquad N_{\delta} = N_{\phi} \cdot \frac{V_p}{V_p + V_u}. \tag{3.96}$$

Абсолютная погрешность  $\Delta x$  измерения количества пузырьков сжатого воздуха в пузырьковой камере по отношению к количеству пузырьков, измеряемых в жидкости резервуара, в которую погружено изделие, составляет

$$\Delta x = N_{\phi} - N_{\delta} \,, \tag{3.97}$$

а относительная погрешность  $\beta$ , %

$$\beta = \frac{N_{\phi} - N_{\delta}}{N_{\phi}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{1}{1 + V_u/V_p}\right) \cdot 100, \qquad (3.98)$$

где  $V_u$  – объем испытываемого на герметичность изделия, м<sup>3</sup>;

 $V_p$  – объем эталонной емкости, м<sup>3</sup>.

В таблице 3.2 приведены значения относительной погрешности измерения количества пузырьков сжатого воздуха в пузырьковой камере относительно количества пузырьков сжатого воздуха, выходящих через микрощель изделия, для различных значений отношения объема изделия к объему эталонной емкости  $V_u/V_p$ .

## Таблица 3.2

| Отношен       | 0,005         | 0,0075 | 0,010 | 0,015 | 0,020 |      |
|---------------|---------------|--------|-------|-------|-------|------|
| Относительная | Теоретическая | 0,50   | 0,74  | 0,99  | 1,48  | 1,96 |
| погрешность   | Эксперимен-   |        | _     | 1,06  | 1,51  | 2,12 |
| p, 70         | тальная       |        |       |       |       |      |

Продолжение таблицы 3.2

| Отношен       | 0,025         | 0,030 | 0,050 | 0,075 | 0,100 |      |
|---------------|---------------|-------|-------|-------|-------|------|
| Относительная | Теоретическая | 2,44  | 2,91  | 4,76  | 6,98  | 9,09 |
| погрешность   | Эксперимен-   | -     | -     | 4,92  | -     | 9,24 |
| p, $70$       | тальная       |       |       |       |       |      |

Формулу (3.98) запишем в следующем виде

$$V_p = [(100/\beta) - 1] \cdot V_u.$$
(3.99)

Эта формула позволяет выбирать необходимый объем эталонной емкости в зависимости от проектируемой (допустимой) относительной погрешности измерений утечек сжатого воздуха из изделия, испытываемого на герметичность.

Выражение (3.99) представим как

$$\frac{V_u}{V_p} = \frac{1}{(100/\beta) - 1}.$$
(3.100)

Это соотношение позволяет составить таблицу для выбора объема эталонной емкости в зависимости от необходимой точности измерения пузырьков сжатого воздуха в пузырьковой камере и отношения объемов изделия и эталонной емкости. Такие данные приведены в таблице 3.3.

Например, при проектируемой точности измерения негерметичности изделия, не превышающей 1 %, необходимо выбрать соотношение  $V_u/V_p$  по таблице 3.2, равное 0,010, а объем эталонной емкости для изделия, испытываемого на герметичность с объемом, равным  $15 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>, в соответствии с таблицей 3.3, составит 1,50 м<sup>3</sup>.

| 2                      | Объем эталонной емкости $V_p$ , м <sup>3</sup> |       |       |       |       |       |       |       |  |
|------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| $V_u$ , M <sup>3</sup> | Отношение V <sub>u</sub> /V <sub>p</sub>       |       |       |       |       |       |       |       |  |
|                        | 0,005  | 0,010 | 0,015 | 0,020 | 0,025 | 0,030 | 0,050 | 0,100 |  |
| $1 \cdot 10^{-3}$      | 0,20   | 0,10  | 0,07  | 0,05  | 0,04  | 0,03  | 0,02  | 0,01  |  |
| $5 \cdot 10^{-3}$      | 1,00   | 0,50  | 0,35  | 0,25  | 0,20  | 0,15  | 0,10  | 0,05  |  |
| $10.10^{-3}$           | 2,00   | 1,00  | 0,70  | 0,50  | 0,40  | 0,30  | 0,20  | 0,10  |  |
| $15 \cdot 10^{-3}$     | 3,00   | 1,50  | 1,05  | 0,75  | 0,60  | 0,45  | 0,30  | 0,15  |  |
| $20.10^{-3}$           | 4,00   | 2,00  | 1,40  | 1,00  | 0,80  | 0,6   | 0,40  | 0,20  |  |
| $30.10^{-3}$           | 6,00   | 3,00  | 2,10  | 1,50  | 1,20  | 0,90  | 0,60  | 0,30  |  |

Таблица 3.3 - Значения объема эталонной емкости,  $M^3$ , в зависимости от соотношения  $V_u/V_p$  и объема изделия  $V_u$ 

3.1.4.4 О пороге чувствительности пузырькового камерного метода

Порог чувствительности пузырькового метода испытаний на герметичность изделий с компрессионным способом реализации  $B_{\Pi}$ , м<sup>3</sup>·Па/с, когда изделие погружают в ванну с индикаторной жидкостью, заполняют его пробным газом под давлением и о герметичности судят по появлению пузырьков газа, оценивают по выражению [5]

$$B_{\Pi} = \frac{\pi D_n^3}{t} \left( \frac{4\sigma}{D_n} + \rho g h + P_a \right), \qquad (3.101)$$

где *D<sub>n</sub>* – минимальный диаметр пузырька, м;

*t* – время от момента образования пузырька газа до его отрыва от изделия, испытываемого на герметичность, с;

 $\sigma$  – поверхностное натяжение индикаторной жидкости, H/м;

 $\rho$  – плотность индикаторной жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

g – ускорение силы тяжести, м/ $c^2$ ;

*h* – высота столба индикаторной жидкости, находящейся над выходящим через микрощель пузырьком, м;

 $P_a$  – атмосферное давление, Па. Принимаем, что t = 5 с,  $D_n = 4,3 \cdot 10^{-3}$  м, h = 1 м, тогда

$$B_{II} = \frac{3.14 \cdot (4.3 \cdot 10^{-3})^3}{5} \left( \frac{4 \cdot 72.5 \cdot 10^{-3}}{4.3 \cdot 10^{-3}} + 998 \cdot 9.81 \cdot 1 + 10^5 \right) = 5.52 \cdot 10^{-3}, \text{ m}^3 \cdot \Pi \text{a/c}.$$

При дифференциальном пузырьковом камерном методе испытаний изделий оценку порога чувствительности можно проводить по выражению, которое вытекает из формулы (3.101) с учетом того, что атмосферное давление  $P_a$ компенсируются подобно тому, как компенсируются избыточные давления в эталонной емкости и изделии

$$B_{\Pi \square -1} = \frac{\pi D_n^3}{t} \left( \frac{4\sigma}{D_n} + \rho g h \right), \qquad (3.102)$$

где  $B_{\Pi \not\subset -1}$  – показатель порога чувствительности при испытаниях изделий на герметичность дифференциальным пузырьковым камерным методом, м<sup>3</sup>·Па/с, который при h = 0,1 м для пузырьковой камеры принимает значение

$$B_{\Pi \square -1} = \frac{3,14 \cdot (4,3 \cdot 10^{-3})^3}{5} \left( \frac{4 \cdot 72,5 \cdot 10^{-3}}{4,3 \cdot 10^{-3}} + 998 \cdot 9,81 \cdot 0,1 \right) = 5,23 \cdot 10^{-5}.$$

Согласно формуле (3.16) потери давления на формирование пузырьков сжатого воздуха на срезе барботажной трубки с учетом выталкивающих сил Архимеда определяются выражением (учитывая, что при выводе этой формулы принималось условие - диаметр формируемого на срезе барботажной трубки пузырька воздуха равен диаметру барботажной трубки)

$$\Delta P_{\phi n} = 3 \frac{\sigma}{D_n} + \frac{3}{16} \rho g D_n, \qquad (3.103)$$

где  $D_n$  – диаметр пузырька сжатого воздуха, м. Из формулы (3.102), с учетом выражения (3.103), получим

$$B_{\Pi \square -2} = \frac{\pi D_n^3}{t} \left( 3 \frac{\sigma}{D_n} + \frac{3}{16} \rho g D_n + \rho g h \right)$$
(3.104)

ИЛИ

$$B_{\Pi,\Pi=2} = \frac{3,14 \cdot (4,3 \cdot 10^{-3})^3}{5} \left( \frac{3 \cdot 72,5 \cdot 10^{-3}}{4,3 \cdot 10^{-3}} + \frac{3}{16} \cdot 998 \cdot 9,81 \cdot 4,3 \cdot 10^{-3} + 998 \cdot 9,81 \cdot 0,1 \right) = 5,77 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \Pi a/c.$$

Значение  $B_{\Pi Z-2}$  почти совпадает со значением  $B_{\Pi Z-1}$ . Это указывает на достоверность рассматриваемых выражений (3.102) и (3.104). Однако, выражение (3.104) позволяет глубже оценить работу пузырьковой камеры. Например, если путем дросселирования понизить уровень жидкости в барботажной трубке до нижнего среза, тогда перепад давления на трубке возрастает на величину  $\rho gh$  и формула (3.104) принимает вид

$$B_{\Pi \square -3} = \frac{\pi D_n^3}{t} \left( 3\frac{\sigma}{D_n} + \frac{3}{16}\rho g D_n \right).$$
(3.105)

Подставив численные значения в эту формулу, получим оценку порога чувствительности на порядок ниже, чем по формуле (3.104)
$$B_{\Pi \square -3} = \frac{3,14 \cdot (4,3 \cdot 10^{-3})^3}{5} \left( \frac{3 \cdot 72,5 \cdot 10^{-3}}{4,3 \cdot 10^{-3}} + \frac{3}{16} \cdot 998 \cdot 9,81 \cdot 4,3 \cdot 10^{-3} \right) = 2,92 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \Pi a/c.$$

Если в устройстве испытаний создавать возмущения давления, чтобы формировался периодически мениск пузырька, определяемый силами поверхностного натяжения жидкости, тогда формула (3.105) принимает вид

$$B_{\Pi \square -4} = \frac{3}{16} \frac{\pi \rho g D_n^4}{t}.$$
 (3.106)

Подставив численные значения величин в эту формулу, получим  $B_{\Pi \square -4} = 3,94 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \Pi a/c$ , то есть, еще на один порядок порог чувствительности ниже, чем по формуле (3.105).

Таким образом, путем дросселирования части пробного газа из изделия в атмосферу, понижая уровень жидкости в барботажной трубке до нижнего среза, и создавая возмущения давления, порог чувствительности пузырькового камерного дифференциального метода испытаний на герметичность изделий понижается от  $B_{\Pi Z-1} = 5,23 \cdot 10^{-5}$  и  $B_{\Pi Z-2} = 5,77 \cdot 10^{-5}$  до  $B_{\Pi Z-4} = 3,94 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>·Па/с, то есть на два порядка.

Если же сравнивать полученные результаты с пузырьковым камерным обычным не дифференциальным методом, тогда получим, что  $B_{\Pi} = 5,52 \cdot 10^{-3}$ , м<sup>3</sup>·Па/с, а  $B_{\Pi Z-4} = 3,94 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>·Па/с и различия по порогу чувствительности отличаются на четыре порядка.

# 3.2 Сравнительная оценка течения газа через микрощели изделий систем испытаний на герметичность

# 3.2.1 Определение избыточного давления в микрощелях изделий при погружении в индикаторную жидкость за счет поверхностного натяжения жидкости

Поверхностное натяжение представляет собой термодинамическую характеристику поверхности раздела двух фаз и определяется работой обратимого изотермического образования единицы площади этой поверхности [70]. Поверхностное натяжение жидкости способствует созданию в ней дополнительного давления, которое вычисляется по формулам (3.3) и (3.4).

Испытания, например, автотракторных теплообменников на герметичность осуществляются путем заполнения их сжатым воздухом под избыточным давлением 0,10 - 0,15 МПа и погружения в резервуар с жидкостью. По выходящим в течение 30 с пузырькам воздуха делают заключение о герметичности теплообменника. На рисунке 3.18 приведены результаты расчетов изменения избыточного давления за счет действия поверхностного натяжения жидкости в микрощелях изделий, погружаемых при испытаниях на герметичность в резервуар с водой. Определение избыточного давления проводилось по формуле (3.4) для поверхностного натяжения воды  $\sigma' = 72,5 \cdot 10^{-3}$  Н/м, имеющей температуру 20 <sup>0</sup>С и соприкасающейся с воздухом.



Рисунок 3.18 - Изменение избыточного давления в микрощелях изделий, погружаемых в резервуар с водой, за счет поверхностного натяжения воды (для щелей  $d_{uu} = 0.5 - 10$  мкм)

По рисунку 3.18 и формуле (3.4) можно определить размер микрощели, через которую при заданном давлении воздуха внутри изделия воздух в атмосферу не будет проходить. При давлении сжатого воздуха, подводимого в изделие, равном 0,1 МПа, микрощели диаметром менее 2,9 мкм, в соответствии с формулой (3.4), не будут пропускать сжатого воздуха, а при давлениях 0,12 МПа и 0,15 МПа предельный размер микрощелей составит 2,42 мкм и 1,98 мкм.

На рисунке 3.18 отмечены пунктирными линиями со стрелками эти давления и соответствующие им значения диаметров микрощели. В ПО «Радиатор» испытания на герметичность теплообменников обычно проводятся при давлении 0,12 МПа, поэтому микрощели менее 2,42 мкм не могут быть обнаружены.

При испытаниях изделий на герметичность путем погружения в резервуар с жидкостью на микрощели кроме сил поверхностного натяжения действует давление столба жидкости, находящейся над микрощелью. Принимаем, что средняя глубина погружения изделия в резервуар с жидкостью при испытаниях на герметичность составляет около 300 мм водного столба. Этот уровень жидкости создает дополнительное противодействующее расходу воздуха давление, равное 3000 Па.

Учитывая статическое давление столба жидкости, минимально обнаруживаемая щель при испытаниях на герметичность изделий путем погружения в жидкость в соответствии с формулой (3.4) для давления 0,12 МПа,  $d_{u} = 4\sigma/(\Delta P_{\kappa} - 3000) = 4 \cdot 72,5 \cdot 10^{-3}/(1,2 \cdot 10^5 - 3000) = 2,48$  мкм.

#### 3.2.2 Расход сжатого воздуха через микрощели изделий в атмосферу

В настоящее время отсутствует обобщенная теория течения газовых или жидких сред через микрощели, которые выявляются в изделиях при испытаниях на герметичность. Однако, при исследованиях герметичности изделий требуются часто не абсолютные значения расходов жидких или газообразных сред и перепадов давлений на конкретных микрощелях, а сравнительные данные по расходу среды или перепаду давлений для подобных (одинаковых по геометрическим размерам) микрощелей, но работающих в различных режимах или условиях.

Именно проведение сравнительного анализа работы микрощелей в различных условиях (различные рабочие среды, их температура, давление, вид среды, создающей противодавление) является одной из основных задач, рассматриваемых в настоящем подразделе. Для решения таких задач целесообразно использовать теоретические положения гидромеханики.

С целью выяснения основных закономерностей истечения сжатого воздуха через микрощели изделий при испытании на герметичность рассмотрены теоретические положения для определения:

- расхода сжатого воздуха через микрощели изделий в атмосферу;

- расхода сжатого воздуха через микрощели изделий в газообразную среду с противодавлением, равным давлению создаваемому высотой столба жидкости, находящейся над микрощелью изделий;

- расхода сжатого воздуха через микрощели изделий в газообразную среду с противодавлением, равным сумме давлений, создаваемых высотой столба воды, находящейся над микрощелью изделия, и поверхностным натяжением воды, в которую погружено изделие;

- расхода сжатого воздуха через микрощели изделий, испытываемых на герметичность, в зависимости от температуры поверхности изделия, сжатого воздуха, находящегося внутри изделия, и температуры жидкости, в которую погружено изделие.

На рисунке 3.19 приведена схема истечения сжатого воздуха в атмосферу через микрощель изделия. Внутри изделия и по сечению 1-1 находится сжатый воздух давлением  $P_1$ , плотностью  $\rho_1$  и температурой  $T_1$ . Скорость воздуха  $U_1$  внутри изделия принимается равной нулю потому, что геометрические размеры изделия во много раз больше размеров микрощелей.



Рисунок 3.19 - Схема истечения сжатого воздуха в атмосферу через микрощель изделия

На выходе сжатого воздуха из микрощели в сечении 2-2 скорость воздуха  $U_2$ , давление  $P_2$ , плотность  $\rho_2$  и температура  $T_2$ . Процесс истечения сжатого воздуха через микрощели принимается адиабатическим. Для сечений 1-1 и 2-2 уравнение Бернулли для газообразной среды принимает вид [69]

$$\frac{U_2^2}{2} + \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_2}{\rho_2} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{\rho_1}, \qquad (3.107)$$

где  $\kappa$  - показатель адиабаты (для воздуха  $\kappa = 1,4$  [70]). Решив уравнение (3.107) относительно  $U_2$ , получим

$$U_{2} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_{1}}{\rho_{1}} \left( 1 - \frac{P_{2}}{P_{1}} \cdot \frac{\rho_{1}}{\rho_{2}} \right)}.$$
 (3.108)

Для адиабатического истечения воздуха через микрощель, используя соотношение [69]

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{-\frac{1}{k}},$$
(3.109)

получим, что

To 
$$U_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{\rho_1}} \left( 1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right).$$
 (3.110)

В работе [71], рассматривая истечение газа из полости (камеры) через короткое сужение в другой объем для политропного процесса, получена формула (преобразованная к величинам в нашей работе) для определения скорости  $U_{2}^{*}$  потока

$$U_{2}^{*} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_{1}}{\rho_{1}} \left(1 - \left(\frac{P_{2}}{P_{1}}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right)},$$

где *n* – показатель политропы.

В той же работе [71] авторы отмечают, что на практике обычно предполагают, что процесс истечения газа (для пневматических систем) является адиабатическим, при котором показатель политропы n = k равен показателю адиабаты и формула для  $U_2^*$  принимает вид формулы (3.110).

Массовый расход сжатого воздуха через микрощель диаметром  $d_{u}$  определяется по формуле расхода воздуха через сопло [69]

$$G_{uu}=\frac{\pi}{4}d_{uu}^2\rho_2 U_2.$$

Это выражение с учетом формул (3.109) и (3.110) принимает следующий вид

$$G_{uu} = \frac{\pi}{4} d_{uu}^2 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/\kappa} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \rho_1 P_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\kappa-1)/\kappa}\right]}, \qquad (3.111)$$

где *G*<sub>*u*</sub> – массовый расход воздуха через микрощель, кг/с;

*d*<sub>*u*</sub> – диаметр микрощели, м;

Р<sub>1</sub> и Р<sub>2</sub> - давление среды до и после микрощели, Па;

 $\rho_1$  — плотность сжатого воздуха, протекающего через микрощель,  $\kappa r/m^3.$ 

Для объемного расхода воздуха  $Q_{\mu\mu}$  в м<sup>3</sup>/с через микрощель формула (3.111) принимает вид

$$Q_{\mu\mu} = \frac{\pi}{4} d_{\mu\mu}^2 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/\kappa} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\kappa-1)/\kappa}\right]}.$$
 (3.112)

При выводе формул (3.111) и (3.112) предполагалось, что истечение воздуха через микрощель происходит аналогично истечению воздуха через сопло. Однако, микрощели отличаются от сопел расходными характеристиками из-за отсутствия закруглений на входе потока в микрощель. Для учета этих различий обычно в формулы расхода воздуха вводится коэффициент расхода  $\varphi$ . С учетом принятых допущений формула (3.112) принимает вид

$$Q_{\mu\mu} = \varphi \frac{\pi}{4} d_{\mu\mu}^2 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/\kappa} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{\rho_1}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\kappa-1)/\kappa}\right], \quad (3.113)$$

где  $\phi$  – коэффициент расхода сжатого воздуха через микрощель изделия (принимается  $\phi$  = 0,75).

Сопоставим зависимость (3.113) с формулами других авторов. Расход сжатого воздуха, определенный по формуле (3.113) для микрощели диаметром  $d_{u_l} = 4,8$  мкм при  $P_1 = 0,22$  МПа;  $P_2 = 0,10$  МПа;  $\rho_1 = 1,27$  кг/м<sup>3</sup>;  $\kappa = 1,4$ , составляет  $Q_{u_l} = 3,82$  мм<sup>3</sup>/с.

Известна, например, формула Пуазейля [70] для течения жидкости в тонкой цилиндрической трубке, которая, в принципе, применима и для газов  $Q = \frac{\pi}{128} \cdot \frac{P_1 - P_2}{L} \cdot \frac{d^4}{\mu}$ . В этой формуле диаметр трубки принимаем равным диаметру щели  $d = 4,8\cdot10^{-6}$  м; L = 0,01 м – длина щели; давления до и после щели:  $P_1 = 0,22$  МПа;  $P_2 = 0,10$  МПа;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, который для воздуха равен 172·10<sup>-7</sup> Па·с [62]. По этим данным получим  $Q = 98\cdot10^{-9}$  м<sup>3</sup>/с = 98 мм<sup>3</sup>/с.

Результирующий расход по формуле Пуазейля почти в 25 раз больше расхода, подсчитанного по формуле (3.113). Это подтверждает данные, например, работы [71], в которой отмечается, что формула Пуазейля не применима к течению газов через щели с тонкой стенкой.

В работе [71] применительно к дросселям с тонкой стенкой («тонкой шайбой») приводится формула для массового расхода G, кг/с. Разделив левую и правую части этой формулы на плотность газа  $\rho_{c}$ , получим объемный расход  $Q_{d}$ ,

м<sup>3</sup>/с, газа в следующем виде 
$$Q_{\partial} = \varphi \frac{\pi d_{u_l}^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho_2} (P_1 - P_2)}$$
 или  $Q_{\partial} = 5,97 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{c} = 5,97 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{c} = 5,97 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{c$ 

5,97 мм<sup>3</sup>/с.

Полученный результат почти в два раза больше значения, определенного по формуле (3.113). Связано это, в основном, с тем, что при выводе формулы для дросселя принимается, что потери давления на дросселе незначительные, а давление на выходе дросселя близкое к давлению на его входе.

Рассматривая истечение газа из полости (камеры) через короткое сужение (а не через дроссель) в другой объем для политропного процесса, авторы работы [71] получили формулу для определения массового расхода, которая фактически совпадает с формулой Сен-Венана и Ванцеля (полученной ими в 1839 году), если принять, что n = k. Формула Сен-Венана и Ванцеля (преобразованная к величинам в нашей работе и объемному расходу  $Q_{\mu\mu}^*$ ,  $M^3/c$ ) имеет вид

$$Q_{\mu\mu}^{*} = \varphi \frac{\pi}{4} d_{\mu\mu}^{2} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_{1}}{\rho_{1}}} \left[ \left( \frac{P_{2}}{P_{1}} \right)^{2/\kappa} - \left( \frac{P_{2}}{P_{1}} \right)^{(\kappa+1)/\kappa} \right],$$

по которой определяем, что  $Q_{u\mu}^* = 3,81 \text{ мм}^3/\text{с}$ . Результат вычислений, полученный по формуле Сен-Венана и Ванцеля (3,81 мм $^3/\text{с}$ ), такой же, как и по формуле (3.113) (3,82 мм $^3/\text{с}$ ).

В подпункте 3.2.1. установлено, что при испытаниях изделий на герметичность путем погружения в резервуар с водой и наличии в изделии микрощелей с условным диаметром, меньшим 2,48 мм, расхода сжатого воздуха из изделия при давлении, равном 0,12 МПа, не будет наблюдаться. Связано это с противодействием давления, создаваемого за счет капиллярного натяжения воды и столба жидкости, находящейся над щелью.

Однако, при испытании изделия без погружения в воду через такие микрощели будет проходить сжатый воздух в атмосферу. Через микрощель  $d_{u_l} = 2,48$  мкм расход воздуха составляет 1,99 мм<sup>3</sup>/с. Учитывая, что испытание многих изделий на герметичность осуществляется на протяжении 30 с, тогда расход воздуха через эту микрощель составит 1,99 · 30 = 59,7 мм<sup>3</sup>/30 с.

Допустим, что расход воздуха через микрощель изделий измеряется с помощью пузырьковой камеры и в жидкости камеры формируются пузырьки воздуха диаметром, равным 2,2 мм. Объем воздуха, заключенного в одном пузырьке составит

$$V_n = 1/6 \pi d_n^3 = 1/6 \pi 2, 2^3 = 5,58 \text{ MM}^3.$$

Количество пузырьков, которое может пройти через пузырьковую камеру за 30 с составляет 59,7 мм<sup>3</sup>/30 с: 5,58 мм<sup>3</sup> = 10,7 штук. Этот результат показывает, что при испытаниях изделий без погружения в резервуар с жидкостью можно осуществить более точный контроль герметичности.

Определим, какие минимальные микрощели могут быть выявлены при испытаниях изделий сжатым воздухом, используя пузырьковую камеру, в которой формируются пузырьки сжатого воздуха диаметром, равным 2,2 мм. Допустим, что за 30 с испытания изделия на герметичность должно пройти не менее двух пузырьков воздуха через пузырьковую камеру. Объем воздуха, заключенный в двух пузырьках диаметром 2,2 мм, составляет  $5,58 \cdot 2 = 11,16 \text{ мм}^3$ .

По формуле (3.113) определяем, что для расхода воздуха, равного 11,16 :  $30 = 0,372 \text{ мм}^3/\text{с}$ , диаметр щели  $d_{u_{l}min} = 1,08 \text{ мкм}$ . Сравнивая микрощели диаметром 2,48 мкм и 1,08 мкм, можно сделать вывод, что при испытаниях изделий без погружения в резервуар с водой по расходу воздуха через микрощель в атмосферу можно выявить микрощели диаметром в 2,3 раз меньшим, чем при испытаниях изделий погружением в воду.

### **3.2.3** Расход сжатого воздуха через микрощели изделий в воздушную камеру с избыточным давлением

Определение расхода сжатого воздуха через микрощели изделий в воздушную камеру с избыточным давлением проводится для выяснения влияния на истечение воздуха через микрощели изделий, погружаемых в резервуар с жидкостью при испытаниях на герметичность, двух составляющих, а именно: давления, создаваемого столбом жидкости, находящейся над щелью, и противодавления, создаваемого жидкостью за счет поверхностного натяжения.

Для определения расхода воздуха через микрощель изделия в воздушную камеру с избыточным давлением, равным давлению, создаваемому столбом жидкости, находящейся над щелью, используем уравнение (3.113). Это уравнение принимает следующий вид

$$Q_{uu} = \varphi \frac{\pi}{4} d_{uu}^2 \left( \frac{P_2 + P_{cm}}{P_1} \right)^{1/\kappa} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{\rho_1}} \left[ 1 - \left( \frac{P_2 + P_{cm}}{P_1} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right], \quad (3.114)$$

где  $P_{cm}$  - статистическое давление над микрощелью, создаваемое столбом жидкости, находящейся над изделием при испытаниях на герметичность, Па.

Принимая глубину погружения изделия в резервуар с жидкостью, равной 300 мм, получим, что давление, создаваемое этим столбом жидкости, составляет 3000 Па. Давление в камере, в которую вытекает сжатый воздух из изделия, составит  $P_2 + P_{cm} = 10^5 + 3000 = 103000$  Па.

Влияние противодавления, создаваемого жидкостью за счет поверхностного натяжения, действующего в микрощели, на расход воздуха через микрощель изделия необходимо рассматривать с учетом уравнений (3.4) и (3.114) в следующем виде

$$Q_{u_{\ell}}^{1} = \varphi \frac{\pi}{4} d_{u_{\ell}}^{2} \left( \frac{P_{2} + P_{cm} + 4\sigma^{1}/d_{u_{\ell}}}{P_{1}} \right)^{1/\kappa} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_{1}}{\rho_{1}} \left[ 1 - \left( \frac{P_{2} + P_{cm} + 4\sigma^{1}/d_{u_{\ell}}}{P_{1}} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right]}.(3.115)$$

Результаты вычислений расхода воздуха через микрощели с учетом приложенного к воздуху внутри изделия давления, давления столба воды, действующего на микрощель в виде гидростатического давления, и давления, создаваемого поверхностными силами натяжения воды в микрощелях, приведены на рисунке 3.20 (кривая 1).



Рисунок 3.20 - Расход сжатого воздуха через микрощели изделий в воздушную камеру с противодавлением, равным давлению столба воды, находящейся над микрощелью, и давления, создаваемого в микрощели силами поверхностного натяжения воды (кривая 1) и без противодавления столба жидкости (кривая 2)

Из рисунка 3.20 видно, что при испытаниях изделий на герметичность путем погружения в резервуар с водой и подводе в изделие избыточного давления, равного 0,12 МПа, расхода воздуха через микрощели диаметром, меньше 2,48 мкм, в соответствии с теоретическими положениями, не должно наблюдаться и микрощели с диаметром менее 2,48 мкм не могут быть обнаружены.

При испытаниях изделий на герметичность сжатым воздухом без погружения в резервуар с водой, теоретически могут быть выявлены микрощели с условным диаметром более 0,25 мкм (кривая 2 рисунок 3.20).

#### 3.2.4 Влияние температуры сжатого воздуха и температуры изделия на расход воздуха через микрощели в атмосферу

При испытании изделий на герметичность с помощью сжатого воздуха предполагается целесообразным проводить испытания с помощью подогретого сжатого воздуха или подогретого до заданной температуры изделия. С увеличением температуры воздуха уменьшается его плотность, что приводит к увеличению расхода через микрощели изделия. С другой стороны увеличение температуры изделия способствует раскрытию микрощелей за счет температурного линейного расширения материалов, что также должно увеличивать расход воздуха через микрощель. Вначале рассмотрим влияние температуры сжатого воздуха и температуры изделия на расход воздуха через микрощель в атмосферу, а затем на истечение воздуха в сосуд, заполненный воздухом, с противодавлением, моделирующим истечение воздуха через микрощель в пробную жидкость.

Уравнение Клапейрона – Менделеева имеет вид [70]

$$PV = mRT$$
,

где Р - давление сжатого воздуха в некотором объеме, Па;

V - объем сжатого воздуха, м<sup>3</sup>;

т - масса рассматриваемого объема газа, кг;

R - газовая постоянная сжатого воздуха, м<sup>2</sup>c<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>;

Т - абсолютная температура сжатого воздуха, К.

Представим эту формулу в следующем виде

$$P = \rho RT , \qquad (3.116)$$

где  $\rho$  - плотность сжатого воздуха, кг/м<sup>3</sup>,  $\rho = m/V$ .

Рассматривая два состояния сжатого воздуха, можно записать на основании уравнения (3.116), что  $P_0 = \rho_0 R T_0$  и  $P_1 = \rho_1 R T_1$ . Принимаем, что изделия будут испытываться на герметичность при постоянном давлении, что обеспечивается системой автоматического регулирования давления. В этом случае  $P_0 = P_1$  и  $\rho_0 R T_0 = \rho_1 R T_1$ , откуда

$$\rho_1 = \rho_0 T_0 / T_1. \tag{3.117}$$

Изменение линейных размеров тел и диаметров микрощелей изделий за счет расширения при нагревании описывается следующим уравнением [62]

$$d_{\mu} = d_{\mu0} [1 + \alpha_0 (T_1 - 273)], \qquad (3.118)$$

где  $d_{u}$  - диаметр микрощели при исследуемом значении температуры изделия, м;

*d*<sub>*ш0*</sub> - начальный диаметр микрощели, м;

*T*<sub>1</sub> - абсолютная температура изделия, К;

 $\alpha_0$  - термический коэффициент линейного расширения тел (для латуни [62]  $\alpha_0 = 17,8 \cdot 10^{-6} \, {}^{\circ}\text{C}^{-1}$  в интервале температур от 0 °C до 100 °C).

На основании формул (3.112), (3.117) и (3.118) получим

$$Q_{u_{\ell}} = \varphi \frac{\pi}{4} d_{u_{\ell}0}^{2} \left[1 + \alpha_{0} \left(T_{1} - 273\right)\right]^{2} \left(\frac{P_{2}}{P_{1}}\right)^{1/\kappa} \sqrt{\frac{2k}{k-1}} \frac{P_{1}T_{1}}{\rho_{0}T_{0}} \left[1 - \left(\frac{P_{2}}{P_{1}}\right)^{(\kappa-1)/\kappa}\right].$$
(3.119)

Исходя из условий испытаний, например, автотракторных теплообменников на герметичность, принимаем, что  $\varphi = 0,65$ ;  $P_1 = 2,2\cdot10^5 \text{ Па}$ ;  $P_2 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $\rho_0 = 1,25 \text{ кг/м}^3$  [62];  $\kappa = 1,4$ ;  $\alpha_0 = 1,78\cdot 10^{-6} \text{ 1/°C}$ ;  $T_0 = 273 \text{ K. C yue-том принятых значений величин формула (3.119) принимает следующий вид <math>Q_{uu} = 10,129 d_{uu}^2 (1,78\cdot 10^{-6} T_1 + 0,9995)^2 \sqrt{T_1}$ .

Заменив в этом выражении  $T_1 = t + 273$ , где t - температура сжатого воздуха и изделия в градусах Цельсия, получим

$$Q_{u_{t}} = 10,129 d_{u_{t}}^{2} \left[ 1,78 \cdot 10^{-6} \left( t + 273 \right) + 0,9995 \right]^{2} \sqrt{t + 273} .$$
 (3.120)

Результаты расчетов расхода воздуха через микрощели изделий в атмосферу в зависимости от температуры сжатого воздуха и температуры поверхности изделия по формуле (3.120) показывают, что, например, для микрощели  $d_{ul} = 0,5$  мкм при изменении температуры от 0 °C до 150 °C сжатого воздуха и температуры поверхности изделия объемный расход сжатого воздуха изменяется от 0,044 до 0,072 мм<sup>3</sup>/с на 0,028 мм<sup>3</sup>/с или на 0,000187 мм<sup>3</sup>/с на один градус Цельсия.

Для микрощели  $d_{u_i} = 100$  мкм изменение расхода сжатого воздуха при изменении температуры сжатого воздуха и поверхности изделия от 0 °C до 150 °C происходит от 1620,6 до 2670,0 мм<sup>3</sup>/с, то есть, изменяется на 1049,4 мм<sup>3</sup>/с на указанный диапазон температуры или на 6,99 мм<sup>3</sup>/с на один градус Цельсия. Для сопоставления этих данных по различным диаметрам микрощелей на рисунке 3.21 приведен график изменения расхода сжатого воздуха, вычисленный в процентах к расходу воздуха через микрощель при температуре 0 °C для микрощелей диаметром  $d_{u_i} = 0,5 - 3000$  мкм.



Рисунок 3.21 – Относительный расход сжатого воздуха (в процентах) через микрощели изделий в атмосферу в зависимости от температуры сжа-

того воздуха и температуры поверхности изделий для микрощелей  $d_{uu} = 0,5$  - 3000 мкм

Если учесть, что в летнее время температура сжатого воздуха и температура поверхности изделия составляет около 20  $^{0}$ C, а повысить температуру поверхности изделия возможно не более чем до 70  $^{0}$ C, тогда увеличение расхода воздуха через микрощели составит 0,16  $\cdot$  50 = 9 %.

Из рисунка 3.21 видно, что для рассматриваемых диаметров микрощелей изменение температуры сжатого воздуха и температуры поверхности изделий в интервале от 0  $^{0}$ C до 150  $^{0}$ C приводит к изменению расхода воздуха через микрощели на 24,5 % по отношению к расходу воздуха через микрощели при температуре 0  $^{0}$ C.

В среднем изменение температуры сжатого воздуха, вытекающего через микрощель в атмосферу, и температуры поверхности изделия на  $1^{0}$ С приводит к увеличению расхода сжатого воздуха через эту микрощель при перепаде давления 0,12 МПа на 0,16 % от расхода воздуха через микрощель при температуре  $0^{0}$ С.

При испытаниях изделий на герметичность в резервуаре с подогретой жидкостью, что делают некоторые зарубежные фирмы, возможно более существенное увеличение расхода воздуха не только из-за температурного расширения материала изделия, но и за счет снижения сил поверхностного натяжения жидкости при увеличении температуры.

3.2.5 Влияние температуры сжатого воздуха, жидкости и поверхности изделия на расход воздуха через микрощели изделия в жидкость

Закономерности расхода сжатого воздуха через микрощели изделий при испытаниях на герметичность путем погружения в резервуар с подогретой жидкостью в зависимости от температуры жидкости, сжатого воздуха и поверхности изделия, рассмотрены применительно к модели процессов истечения сжатого воздуха через микрощели изделия в камеру с избыточным давлением, равным по величине сумме давлений, создаваемых столбом жидкости, находящейся над микрощелью, и силами поверхностного натяжения воды.

Принимаем, что температура жидкости, в которую погружается изделие, температура сжатого воздуха, выходящего через микрощель изделия, и температура поверхности изделия одинаковы. Изменение поверхностного натяжения жидкости  $\sigma'$ , Н/м, в зависимости от температуры определяется по формуле [62]

$$\sigma' = \sigma_0 \cdot (1 - \gamma_0 \cdot t), \qquad (3.121)$$

где  $\sigma_0$  - поверхностное натяжение жидкости, Н/м, при температуре 0 <sup>0</sup>C, (для воды  $\sigma_0 = 75,5 \cdot 10^{-3}$  Н/м [62]);

t – температура жидкости, <sup>0</sup>C;

 $\gamma_0$  - температурный коэффициент изменения поверхностного натяжения жидкости,  ${}^0C^{-1}$ ,  $\gamma_0 = 0,2185 \cdot 10^{-4} \; {}^0C^{-1}$  [62].

Расход сжатого воздуха через микрощели изделий при испытаниях их на герметичность путем погружения в резервуар с подогретой жидкостью  $Q_{\mu\mu}^{11}$ , м<sup>3</sup>/с, с учетом формул (3.115), (3.117), (3.118) и (3.121), определяется следующим выражением

$$Q_{uu}^{11} = \varphi \frac{\pi}{4} d_{uu0}^2 (1 + \alpha_0 t)^2 \left\{ \frac{(P_2 + P_{cm})}{P_1} + \left[ \frac{4\sigma_0 (1 - \gamma_0 t)}{P_1 d_{uu0} (1 - \alpha_0 t)} \right] \right\}^{1/\kappa} \sqrt{\frac{2k}{k - 1} \cdot \frac{P_1 \cdot (t + 273)}{\rho_0 T_0}}$$

$$\cdot \sqrt{1 - \left\{\frac{\left(P_{2} + P_{cm}\right)}{P_{1}} + \left[\frac{4\sigma_{0}\left(1 - \gamma_{0}t\right)}{P_{1}d_{\mu0}\left(1 + \alpha_{0}t\right)}\right]\right\}^{-(\kappa-1)/\kappa}}.$$
(3.122)

Принимая, например, значения величин, входящих в формулу (3.122):  $\varphi = 0,65$ ;  $d_{uq0} = 0,5$ ; 2,0; 5,0; 100 и 500 мкм;  $\alpha_0 = 17,8 \cdot 10^{-6} \, ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $P_1 = 2,2 \cdot 10^5 \, \text{Па}$ ;  $P_2 = 1 \cdot 10^5 \, \text{Па}$ ;  $P_{cm} = 3 \cdot 10^3 \, \text{Па}$ ;  $\rho_0 = 1,25 \, \text{кг/м}^3$ ;  $\kappa = 1,4$ ;  $\sigma_0 = 75,5 \cdot 10^{-3} \, \text{H/m}$ ;  $\gamma_0 = 0,218 \cdot 10^{-4} \, ^{0}\text{C}^{-1}$ , получим

$$Q_{\mu\mu}^{11} = d_{\mu\nu0}^{2} \left( 5,856 + 1,042 \cdot 10^{-4} t \right)^{2} \sqrt{t + 273} \left[ 0,468 + \frac{0,302 - 0,659 \cdot 10^{-5}}{d_{\mu\nu0} \left( 2,2 \cdot 10^{5} + 3,916 t \right)} \right]^{1/\kappa} \cdot \sqrt{1 - \left[ 0,468 + \frac{0,302 - 0,659 \cdot 10^{-5} t}{d_{\mu\nu0} \left( 2,2 \cdot 10^{5} + 3,916 t \right)} \right]^{-(\kappa-1)/\kappa}} .$$

$$(3.123)$$

Результаты вычислений расхода сжатого воздуха через микрощели изделий, погруженных в резервуар с водой при испытаниях на герметичность, в зависимости от температуры сжатого воздуха, воды и поверхности изделия показывают, что расход сжатого воздуха через микрощели изделий в воду меньший, чем расход сжатого воздуха через такие же микрощели в атмосферу. Однако, с увеличением диаметра микрощели различие этих расходов воздуха уменьшается.

Например, для микрощели в изделии  $d_{uq} = 5$  мкм расход воздуха в воду в 2,3 раза меньше расхода воздуха через такую же микрощель в атмосферу, а для микрощелей 15 мкм и 100 мкм соответственно в 1,4 и в 1,1 раза расход воздуха в воду меньше, чем расход воздуха в атмосферу.

В монографии [72] приведены результаты экспериментальных исследований расхода сжатого воздуха через четыре микрощели №1 - №4 диаметром: 4,80; 6,73; 10,05 и 25,92 мкм при истечении сжатого воздуха в атмосферу и в воду. Экспериментальные исследования удовлетворительно согласуются с теоретическими данными. Влияние подогрева жидкости и снижение ее поверхностного натяжения оказывает влияния на изменение расхода сжатого воздуха через микрощели менее 100 мкм. Подогревать жидкость или сжатый воздух при испытании изделий на герметичность практически нецелесообразно для выявления микрощелей более 100 мкм.

# 3.3 Основы теории и совершенствование манометрического метода и устройств с горизонтальной трубкой испытаний изделий на герметичность

#### 3.3.1 Базовый способ реализации манометрического метода испытаний изделий с использованием горизонтальной трубки

Испытания на герметичность изделий манометрическим методом по давлению проводятся обычно путем подачи в изделие контрольного газа (например, сжатого воздуха, гелия или смеси сжатого воздуха с гелием) заданного давления от источника, затем изделие отсоединяется от источника газа и берется первый отсчет давления по шкале прибора, подсоединенного к изделию. Изделие выдерживают под установленным давлением в течение заданного промежутка времени, берется второй отсчет по шкале прибора давления и по разности давлений делается заключение о герметичности изделия.

Испытание на герметичность по этому способу может осуществляться как при избыточном давлении, так и при вакуумметрическом давлении (разряжении) в изделии. Испытания изделий манометрическим методом с использованием манометров или вакуумметров характеризуются недостаточной чувствительностью. Связано это с двумя причинами. Во-первых, утечки контрольного газа через микрощели изделия имеют малые расходы, а следовательно малы и снижения давления.

Во-вторых, чувствительность измерительных приборов давления для испытаний изделий на герметичность недостаточная и зависит от испытательного давления. Она определяется классом точности приборов давления, который для технических манометров не превышает 0,5 %. Например, если изделие испытывается при статическом давлении, равном 6,0 МПа (60 кгс/см<sup>2</sup>), тогда необходимо выбрать манометр с пределами измерения от 0 до 10,0 МПа. При классе точности манометра ±0,5 %, погрешность составляет ±0,05 МПа или ±50000 Па. Поэтому более целесообразным при испытаниях на герметичность изделий считается измерение не давления, а разности двух давлений за время испытаний

При испытаниях изделий с использованием приборов и устройств, измеряющих разность давлений, например, горизонтальных трубок или дифференциальных манометров (дифманометров) можно существенно повысить точность контроля герметичности изделий. При том же статическом испытательном давлении, равном 6,0 МПа, можно использовать, например, дифманометр с перепадом давлений, равным 1600 Па, и погрешностью ±32 Па.

Имеются изобретения и патенты по использованию приборов разности давлений при испытаниях изделий на герметичность, которые подробно изложены в работе [72].

Схема базового устройства для испытаний изделий на герметичность газом с использованием горизонтальной трубки приведена на рисунке 3.22. Устройство содержит источник газа (сжатого воздуха) 1, эталонную емкость 3, испытываемое на герметичность изделие 4, горизонтальную трубку 8 с жидкостным поршнем 9, вентили 2, 5, 6, 7 и 10, емкостный измерительный преобразователь 11 и вторичный показывающий прибор 12. Перед подключением изделия 4 к устройству для испытаний все вентили находятся в закрытом положении.

После подключения изделия к устройству заполняют его газом до заданного давления, для чего открывают вентили 2, 6 и 5. Далее закрывают вентиль 2 и открывают вентили 7 и 10, через которые подается газ к горизонтальной трубке.



Рисунок 3.22 – Схема устройства для испытаний изделий на герметичность газом с использованием горизонтальной трубки

# 3.3.2 Определение максимального диаметра горизонтальной трубки с жидкостным поршнем

Определение максимального допустимого диаметра трубки, в которой при горизонтальном положении может существовать жидкостный поршень, рассмотрим по рисунку 3.23. На рисунке представлены: 1 – горизонтальная трубка, 2 – жидкостный поршень (капля жидкости), 3, 4 – части жидкостного поршня, находящиеся между двумя сечениями, проходящими через две плоскости диаметров. Жидкость между двумя сечениями находится под воздействием капиллярного давления и давления от сил тяжести. Капиллярное давление определяется по формуле (3.3)  $\Delta P_n = 2\sigma/R$ , где  $\Delta P_n$  - давление, возникающее в трубке от поверхностного натяжения жидкости, Па;  $\sigma$  - поверхностное натяжение жидкости, Н/м; *R* - радиус трубки, м.



Рисунок 3.23 – Жидкостный поршень в горизонтальной трубке устройства для испытаний изделий на герметичность

Принимаем, что жидкостный поршень может существовать (а не распределяться по нижней части трубки), если давление, возникающее от сил поверхностного натяжения жидкости  $\Delta P_n$  больше давления, возникающего в жидкости под действием сил тяжести, например, в точке А

$$\Delta P_{n} > \rho g h/2, \qquad (3.124)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости в горизонтальной трубке, кг/м<sup>3</sup>;

g – ускорение сил земного тяготения м/ $c^2$ ;

h/2 – высота столба жидкости, м, которая создает давление в точке А. Учитывая, что поверхностное натяжение жидкости действует равномерно по всему периметру круга жидкости в горизонтальной трубке диаметром  $d_{um}$ , м, поэтому  $h/2 = d_{um}/2$ .

Из соотношения (3.3) и (3.124) определяем, что

$$\frac{4\sigma}{d_{um}} > \rho g \frac{d_{um}}{2} \quad \text{или} \qquad d_{um} < 2\sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}} \,. \tag{3.125}$$

Для воды  $\sigma = 72,5 \cdot 10^{-3}$  H/м и  $\rho = 998$  кг/м<sup>3</sup>; для керосина  $\sigma = 28,9 \cdot 10^{-3}$  H/м и  $\rho = 830$  кг/м<sup>3</sup>; для этилового эфира  $\sigma = 16,5 \cdot 10^{-3}$  H/м и  $\rho = 713$  кг/м<sup>3</sup>; для ртути  $\sigma = 487 \cdot 10^{-3}$  H/м и  $\rho = 13546$  кг/м<sup>3</sup>.

Максимальный диаметр горизонтальной трубки, в которой будет существовать устойчивый поршень воды, составляет 7,68 мм, а для керосина, этилового эфира и ртути соответственно 5,32; 4,34 и 5,40 мм.

На рисунке 3.24 представлены изменения давления от сил поверхностного натяжения воды (кривая 1) и этилового эфира (кривая 2) в горизонтальной трубке в зависимости от диаметра трубки, построенные по формуле (3.3), а в таблице 3.4 - для ртути. На кривой 1 точкой А отмечено предельное значение диаметра горизонтальной трубки, в которой существует водяной поршень.

Точкой В на этой кривой отмечен диаметр горизонтальной трубки, который может быть выбран для устройства испытаний изделий, равный, например,

2,5 мм. При таком диаметре горизонтальной трубки водяной поршень существует устойчиво и потери давления не превышают 116 Па.

Если в горизонтальной трубке использовать этиловый эфир, тогда, как видно из кривой 2 на рисунке 3.24, можно выбрать диаметр трубки, равный 2 мм. Потери давления при этом составляют 33,0 Па. Эти потери давления в 3,5 раза меньше, чем потери при использовании воды в горизонтальной трубке диаметром 2,5 мм.



Рисунок 3.24 - Изменения давлений от сил поверхностного натяжения воды (кривая 1) и этилового эфира (кривая 2) в горизонтальной трубке в зависимости от диаметра трубки

Таблица 3.4 - Изменение давления от сил поверхностного натяжения ртути в горизонтальной трубке в зависимости от ее диаметра

| $\Delta P_{\pi}, \Pi a$ | 243,5 | 324,7 | 487,0 | 649,3 | 779,2 | 974,0 | 1298,5 | 1948,0 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| $d_{um}$ , мм           | 8,0   | 6,0   | 4,0   | 3,0   | 2,5   | 2,0   | 1,5    | 1,0    |

Из рисунка 3.24 также следует, что уменьшение диаметра горизонтальной трубки от 8 до 4 мм приводит к увеличению потери давления, при использовании воды в трубке, на 36,3 Па (от 36,2 до 72,5 Па), а уменьшение диаметра трубки от 4 до 1 мм увеличивает потери давления на 217,5 Па. Если выбрать диаметр горизонтальной трубки  $d_{um} = 4$  мм, тогда потери давления будут: при использовании в трубке воды – 72,5 Па; керосина – 28,9 Па; этилового эфира – 16,5 Па; ртути – 487 Па.

### **3.3.3 Определени** касательного напряжения в ламинарном пограничном слое горизонтальной трубки с жидкостным поршнем

Сила трения в ламинарном пограничном слое в цилиндрической трубке (рисунок 3.25) определяется по формуле [73]

$$N_{mp} = (P_1 - P_2) \frac{\pi \cdot d_{um}^2}{4} = \pi \cdot d_{um} \cdot l \cdot \tau_{cm}, \qquad (3.126)$$

где *N<sub>mp</sub>*- сила, возникающая от касательных напряжений в жидкости возле стенок горизонтальной трубки, H;

*P*<sub>1</sub>, *P*<sub>2</sub> – давление газа, Па, с обеих сторон жидкостного поршня;

*d*<sub>*um*</sub> - диаметр трубки, м;

*l*-длина жидкостного поршня в горизонтальной трубке, м;

 $\tau_{cm}$  - касательное напряжение в пограничном слое жидкости возле стенки горизонтальной трубки, Па



Рисунок 3.25 – Схема горизонтальной трубки систем испытаний изделий на герметичность с касательными напряжениями в пограничном слое жидкостного поршня

С другой стороны, потери на трение в трубопроводе [73]

$$P_1 - P_2 = 4\lambda \rho \frac{V_{cp}^2}{2} \cdot \frac{l}{d_{um}},$$
(3.127)

где  $\lambda$  - коэффициент сопротивления;

 $V_{cp}$  – средняя скорость, м/с, перемещения жидкости в трубопроводе.

Известно, что скорость движения частиц жидкости по перпендикулярному к оси сечению трубопровода зависит от режима течения жидкости (ламинарного или турбулентного) и изменяется, например, по параболической зависимости для ламинарного течения жидкости.

Средняя скорость по трубопроводу вычисляется с учетом такого распределения текущих по сечению скоростей частиц жидкости. Однако, в горизонтальной трубке устройства для испытаний изделий на герметичность жидкость в виде жидкостного поршня перемещается как единое целое со скоростью, которая в формуле (3.127) является средней скоростью. Перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке в процессе испытаний на герметичность происходит с малой скоростью потому, что малы допустимые и фактические значения утечек жидкости из изделия.

Течение жидкости характеризуется числовым значением критерия Рейнольдса. Значение критерия Рейнольдса Re определяется по формуле [61]

$$\operatorname{Re} = Vd/v, \qquad (3.128)$$

где *V* – скорость потока жидкости (газа) в трубопроводе, м/с;

*d* – внутренний диаметр трубопровода, м;

*v* – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с.

Для горизонтальной трубки систем испытаний изделий диаметром  $d_{um} = 0,002$  м при скорости перемещения жидкостного поршня V = 0,1 м/с и кинематической вязкости воды  $v = 1,007 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с [62] значение критерия Рейнольдса Re =  $0,1 \cdot 0,002/(1,007 \cdot 10^{-6}) = 199$ .

При ламинарном течении жидкости и значениях Рейнольдса менее 2000 коэффициент сопротивления λ рекомендуется [62] определять по формуле Га-гена - Пуазейля

$$\lambda = 64/\operatorname{Re}.\tag{3.129}$$

Из (3.126) определяем, что  $P_1 - P_2 = 4 l \cdot \tau_{cm} / d_{um}$ . (3.130)

Приравнивая (3.127) и (3.130), получим

$$\tau_{cm} = \lambda \rho V_{cp}^2 / 2 \,. \tag{3.131}$$

С учетом соотношения (3.129) и того, что  $\nu \cdot \rho = \mu$ , где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости жидкости, H·c/м<sup>2</sup> (для воды  $\mu = 1,05 \cdot 10^{-3}$  H·c/м<sup>2</sup> [62]), формула (3.131) принимает вид

$$\tau_{cm} = \frac{64 \nu \rho V_{cp}^2}{2 V_{cp} d_{um}} = \frac{32 \mu V_{cp}}{d_{um}}.$$
 (3.132)

Если, например,  $V_{cp} = 0,1$  м/с и  $d_{um} = 2 \cdot 10^{-3}$  м, тогда  $\tau_{cm} = 32 \cdot 1,05 \cdot 10^{-3}$ <sup>3</sup> · 0,1/2 · 10<sup>-3</sup> = 1,68 Па. Это значение касательного напряжения меньше напряжения (давления) от поверхностного натяжения жидкости в горизонтальной трубке, которое равно  $\Delta P_n = 72,5$  Па, и поэтому на стенках трубки могут появляться микропленки жидкости после движения жидкостного поршня. Экспериментальными исследованиями установлено, что кроме пленки на внутренней поверхности горизонтальной трубки после перемещения жидкостного поршня появляются микрокапли жидкости. При повторном движении жидкостного поршня по измерительной трубке, он движется по жидкостной пленке пограничного слоя и поверхностное натяжение между жидкостным перемещающимся поршнем и пограничной пленкой на горизонтальной трубке, вероятно, будет отличаться от поверхностного натяжения между жидкостным поршнем и поверхностью трубки (то есть при первичном движении поршня по сухой трубке).

На рисунке 3.26 приведена схема устройства для исследования перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке систем испытаний изделий на герметичность.



Рисунок 3.26 - Схема устройства для исследования перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке систем испытаний изделий на герметичность

Устройство содержит трубку 1 (стеклянную или пластмассовую), которая закреплена на основании 2. В трубке расположен жидкостный поршень 3. Основание 2 с одной стороны закреплено на поворотном шарнире, а с другой стороны к капроновой нити 7, наматываемой на барабан 8. Основание 2 может отклоняться от горизонтальной оси Ox на угол  $\pm \beta$ . Перемещение правого конца основания 2 производится от электрического двигателя 10 с планетарным редуктором.

На основании 2 закреплен груз 6. Отклонение основания 2 с трубкой 1 от горизонтальной оси определяется по шкале 4, а также по количеству оборотов вала барабана 8 с учетом каждой двенадцатой части его полного оборота (30<sup>0</sup>). Для этой цели на барабане 8 установлены двенадцать магнитов, которые при вращении барабана проходят мимо геркона 9. Сигналы от геркона поступают на счетчик электрических импульсов 11.

Экспериментальными исследованиями установлено, что перемещение жидкостного поршня повторно по жидкостной пленке происходит при угле  $\beta$ 

на 7 - 9<sup>0</sup> меньшем, чем при первичном перемещении жидкостного поршня по трубке с сухими стенками.

#### 3.3.4 Математическое моделирования расхода газа через горизонтальную трубку при испытаниях изделий на герметичность

Математическое моделирования расхода газа через горизонтальную трубку (рисунок 3.22) проводится с той целью, чтобы установить влияние объемов эталонной емкости, изделия и их соотношения на погрешность измерений утечек газа горизонтальной трубкой и оценить динамические свойства устройства с горизонтальной трубкой, среди которых важнейшими, например, является время переходного процесса и запаздывание от момента начала испытаний изделия до начального смещения жидкостного поршня.

В теоретических положениях этого подраздела принимается, что жидкостный поршень в горизонтальной трубке представлен газовым поршнем. Это позволяет не учитывать инерционные силы в уравнениях движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке. С другой стороны, такой анализ проводится с той целью, чтобы выяснить работу устройства с горизонтальной трубкой при контроле герметичности изделий при уменьшении или сведению к нулю действия инерционных сил, приложенных к жидкостному поршню горизонтальной трубки.

В установившемся режиме массовый расход газа на входе в горизонтальную трубку  $G_1(t)$ , кг/с, равен массовому расходу газа, который выходит из изделия 4 (рисунок 3.22) в виде суммарных утечек через микрощели,  $G_2(t)$ , кг/с, то есть  $G_1(t) = G_2(t)$ .

Для трубопровода с ламинарным течением объемный расход среды Q(t),  $m^3/c$ , определяется по формуле [66]

$$Q(t) = \frac{\pi \cdot d_{um}^4}{128 \cdot \mu_c \cdot l_m} \Delta P(t), \qquad (3.133)$$

где *d<sub>um</sub>, l<sub>m</sub>* – диаметр и длина трубопровода, м;

 $\mu_{c}$  – динамическая вязкость газа, H·c/м<sup>2</sup>;

 $\Delta P(t)$  – разность давлений, Па, приложенная к границам трубопровода.

Массовый расход газа по горизонтальной трубке  $G_I(t)$ , кг/с, учитывая, что  $G_I(t) = Q(t) \cdot \rho_c$ , где  $\rho_c$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>, в соответствии с формулой (3.133), определяется выражением

$$G_1(t) = k_{um} [P_1(t) - P_2(t)], \qquad (3.134)$$

где  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$  – давление газа соответственно в эталонной емкости и изделии, Па; *к<sub>um</sub>* – размерный коэффициент, кг/(с·Па), который представляет проводимость горизонтальной трубки

$$k_{um} = \frac{\pi \cdot d_{um}^4 \cdot \rho_2}{128 \cdot \mu_2 \cdot l_m},\tag{3.135}$$

Для эталонной емкости 3 (рисунок 3.22), если из нее уходит часть газа в изделие, можно написать на основании уравнения состояния газа [69]  $V_1P_1 = m_1RT$  следующие выражения:

$$V_1 \frac{dP_1(t)}{dt} = \frac{dm_1(t)}{dt} RT \quad \text{или} \quad V_1 \frac{dP_1(t)}{dt} = G_1^1(t) RT , \qquad (3.136)$$

где *m*<sub>1</sub> – масса газа в эталонной емкости, кг;

 $dm_1(t)/dt$  – изменения массы газа в эталонной емкости при изменении давления в ней на  $dP_1(t)$ , кг/с;

 $G_1^1(t)$  – расход газа, соответствующий изменению массы газа  $dm_1(t)/dt$ , то есть,  $G_1^1(t) = dm_1(t)/dt$  при изменении давления на  $dP_1(t)$ , кг/с;

R – газовая постоянная, м<sup>2</sup>/(c<sup>2</sup>·K);

Т – абсолютное значение температуры газа, К.

Изменение массы газа  $dm_1(t)/dt$  и расхода газа  $G_1^1(t) = dm_1(t)/dt$  при изменении давления на  $dP_1(t)$  соответствует расходу газа через горизонтальную трубку  $G_1(t)$ , кг/с, но с противоположным знаком (рисунок 3.22), то есть  $G_1^1(t) =$ -  $G_1(t)$ . С учетом этого соотношения из выражения (3.136) получим

$$V_1 \frac{dP_1(t)}{dt} = -G_1(t)RT . (3.137)$$

Дифференцируя по времени (3.134),

$$\frac{dG_1(t)}{dt} = k_{um} \left[ \frac{dP_1(t)}{dt} - \frac{dP_2(t)}{dt} \right]$$
(3.138)

и с учетом выражения (3.137) получим

$$V_1 \frac{dP_2(t)}{dt} + \frac{V_1}{k_{um}} \frac{dG_1(t)}{dt} = -G_1(t)RT .$$
(3.139)

Применительно к утечкам газа из изделия 4 (рисунок 3.22) можно отметить, что значение этих утечек (расход газа через микрощели) определяется давлением в изделии  $P_2(t)$  (именно давлением возле самой стенки внутри изделия), а количество этих утечек (их объем или масса) взаимосвязано с объемом (массой) газа, который находится в изделии и эталонной емкости  $V_1 + V_2$ .

Другими словами, утечки газа из изделия будут до тех пор, пока не выйдет газ полностью из изделия и эталонной емкости, но давление, которое будет определять эти утечки, будет равным  $P_2(t)$ . На основании этого для утечек газа из изделия вместо уравнение состояния газа  $P_2V_2 = m_2RT$  запишем  $P_2(V_1 + V_2) = m_2RT$  или

$$(V_1 + V_2)\frac{dP_2(t)}{dt} = G_2^1(t)RT = -G_2(t)RT, \qquad (3.140)$$

где  $G_2^1(t)$ - массовый расход газа (как бы внутри изделия) за счет изменения массы газа в изделии при уменьшения давления  $P_2$ , кг/с;

 $G_2(t)$  – массовый расход газа из изделия в атмосферу, кг/с, то есть, утечки газа, и направлены они из емкости, поэтому  $G_2^1(t) = -G_2(t)$ .

В формулу (3.139) подставим  $dP_2(t)/dt$  из выражения (3.140) и получим

$$\frac{V_1}{RT \cdot k_{um}} \cdot \frac{dG_1(t)}{dt} + G_1(t) = \frac{V_1}{V_1 + V_2} G_2(t).$$
(3.141)

Преобразуем уравнение (3.141) по Лапласу и определим передаточную функцию расхода газа через горизонтальную трубку относительно утечек газа из изделия

$$W_1(s) = \frac{G_1(s)}{G_2(s)} = \frac{V_1}{(V_1 + V_2)} \cdot \frac{1}{T_{um}s + 1},$$
(3.142)

где *T<sub>um</sub>* – постоянная времени, с, апериодического звена первого порядка

$$T_{um} = V_1 / k_{um} RT . (3.143)$$

Если подать на вход системы с передаточной функцией (3.142) единичное возмущение  $G_2(s)=1/s$  и произвести обратное преобразование по Лапласу полученного выражения, тогда получим

$$G_1(t) = \frac{V_1}{(V_1 + V_2)} \left( 1 - e^{-k_{um}RT \cdot t/V_1} \right).$$
(3.144)

# **3.3.5** Проводимость и гидравлическое сопротивление горизонтальной трубки систем испытаний изделий

В формуле (3.135)  $\kappa_{um}$  – размерный коэффициент, кг/(с·Па), который характеризует гидравлическую проводимость горизонтальной трубки. Гидравлическое сопротивление горизонтальной трубки  $R_{em}$ , с·Па/кг, является обратной величиной от гидравлической проводимости трубки

$$R_{um} = \frac{128 \cdot \mu_2 \cdot l_m}{\pi \cdot d_{um}^4 \cdot \rho_2}.$$
(3.145)

Определим значение  $k_{um}$  для различных диаметров горизонтальной трубки с жидкостным поршнем при прохождении по трубке сжатого воздуха при давлении в системе испытаний, равном, например, 1,0 МПа. Для такого давления плотность сжатого воздуха  $\rho_{e} = 11,67$  кг/м<sup>3</sup> [66], а динамическая вязкость  $\mu_{e} = 18,01 \cdot 10^{-6}$  Па·с [74]. Длину горизонтальной трубки принимаем равной 0,5 м.

В таблице 3.5 и на рисунке 3.27 приведены значения проводимости  $\kappa_{um}$  и гидравлического сопротивления  $R_{um}$  горизонтальной трубки в зависимости от ее диаметра при испытательном давлении, равном 1,0 МПа, вычисленные по формулам (3.135) и (3.145).

Таблица 3.5 - Изменение проводимости и гидравлического сопротивления горизонтальной трубки

| Диаметр горизон- | Проводимость гори-                  | Гидравлическое сопротив-          |  |  |
|------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--|--|
| тальной трубки   | зонтальной трубки к <sub>ит</sub> , | ление горизонтальной труб-        |  |  |
| $d_{um}$ , мм    | кг/с∙Па                             | ки <i>R<sub>um</sub>,</i> Па·с/кг |  |  |
| 1,5              | 0,16.10-6                           | $6,12 \cdot 10^{+6}$              |  |  |
| 2,0              | $0,52 \cdot 10^{-6}$                | $1,93 \cdot 10^{+6}$              |  |  |
| 2,5              | 1,26 .10-6                          | $0,79 \cdot 10^{+6}$              |  |  |
| 3,0              | $2,61 \cdot 10^{-6}$                | $0,38 \cdot 10^{+6}$              |  |  |
| 4,0              | $8,26 \cdot 10^{-6}$                | 0,12.10+6                         |  |  |
| 6,0              | $41,8 \cdot 10^{-6}$                | $0,024 \cdot 10^{+6}$             |  |  |
| 8,0              | $132,2 \cdot 10^{-6}$               | $0,0076 \cdot 10^{+6}$            |  |  |



Рисунок 3.27 – Изменение проводимости  $\kappa_{um}$  и гидравлического сопротивления  $R_{um}$  горизонтальной трубки в зависимости от ее диаметра при испытательном давлении, равном 1,0 МПа

#### 3.3.6 Статические погрешности при контроле герметичности изделий горизонтальной трубкой по утечкам газа и выбор объема эталонной емкости

Для статического режима работы устройства испытаний изделий на герметичность с использованием горизонтальной трубки, учитывая, что изделие должно быть герметичным при испытаниях или иметь допустимые значения утечек газа, которые по суммарному объему существенно меньшие по сравнению с объемом газа при испытательном давлении в изделии и эталонной емкости, можно представить выражение (3.144) при  $t = \infty$  в следующем виде

$$G_1 = \frac{V_1}{(V_1 + V_2)} G_2, \qquad (3.146)$$

где  $G_1$  – массовый расход газа в горизонтальной трубке, кг/с;

*G*<sub>2</sub> – суммарный массовый расход газа (утечки газа) через микрощели изделия, испытываемого на герметичность, кг/с.

Абсолютная погрешность  $\Delta_{em}$ , кг/с, измеряемого массового расхода газа в горизонтальной трубке  $G_1$  по отношению суммарному массовому расходу газа (утечкам газа)  $G_2$  через микрощели изделия,  $\Delta_{em} = G_2 - G_1$ , а относительная по-грешность  $\beta_{em}$ , %,

$$\beta_{em} = \frac{G_2 - G_1}{G_2} \cdot 100 \quad \text{или} \qquad \beta_{em} = \frac{G_2 - \frac{V_1}{V_1 + V_2}G_2}{G_2} \cdot 100 = \left(\frac{V_2}{V_1 + V_2}\right) \cdot 100 . \quad (3.147)$$

τ7

Из выражения (3.147) следует, если выбрать объем эталонной емкости, как обычно выбирают на промышленных предприятиях, равный объему испытываемого на герметичность изделия, тогда относительная погрешность измерения массового расхода суммарных утечек газа из изделия по измеряемому расходу газа в горизонтальной трубке составляет 50 %.

Выбор необходимого объема эталонной емкости в зависимости от заданной относительной погрешности измерений массового расхода газа (утечек газа) из изделия при испытаниях на герметичность производится по формуле (3.147), записанной в следующем виде

$$V_1 = V_2 [(100 / \beta_{em}) - 1].$$
(3.148)

#### 3.3.7 Возможные перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке в установившемся режиме при испытаниях изделий различных классов герметичности

Возможные перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке в установившемся режиме при испытаниях изделий различных классов герметичности рассмотрим на примере затворов трубопроводной арматуры.

Если в формуле (3.146) правую и левую части умножить на плотность сжатого воздуха, тогда получим

$$Q_1 = \frac{V_1}{(V_1 + V_2)} Q_2, \qquad (3.149)$$

где  $Q_1$ -объемный расход воздуха через горизонтальную трубку, м<sup>3</sup>/с;

 $Q_2$  –суммарный объемный расход воздуха (утечки воздуха) через микрощели изделия, испытываемого на герметичность, м<sup>3</sup>/с.

Принимаем, что относительная погрешность измерения расхода воздуха  $Q_1$  в горизонтальной трубке не должна превышать ± 1%, тогда объем эталонной емкости  $V_1$  согласно соотношению (3.148) составит 0,99 м<sup>3</sup> для изделий объемом  $V_2 = 0,01$  м<sup>3</sup>.

Для определения возможных перемещений жидкостного поршня в горизонтальной трубке в установившемся режиме при испытаниях изделий различных классов герметичности на примере затворов трубопроводной арматуры принимаем, что объемный расход воздуха в горизонтальной трубке  $Q_1$  равен суммарному объемному расходу воздуха (утечкам воздуха)  $Q_2$  через микрощели изделия, испытываемого на герметичность. В таблице 3.6 приведены максимально допустимые утечки воздуха для затворов трубопроводной арматуры согласно ГОСТ 9544-93 [6] для диаметров DN трубопроводной арматуры. Таблица 3.6 - Максимально допустимые утечки воздуха для затворов трубопроводной арматуры согласно ГОСТ 9544-93 [6]

| Классы герметичности |         |       |                      |      |                      |     |                      |
|----------------------|---------|-------|----------------------|------|----------------------|-----|----------------------|
| Α                    |         | В     |                      | С    |                      | D   |                      |
| Нет                  | видимых | 0,018 | см <sup>3</sup> /мин | 0,18 | см <sup>3</sup> /мин | 1,8 | см <sup>3</sup> /мин |
| утечек воздуха       |         | ·DN   |                      | ·DN  |                      | ·DN |                      |

В ГОСТ 9544-93 [6] также указывается, что погрешность измерения утечек воздуха не должна превышать  $\pm 0,01$  см<sup>3</sup>/мин для утечек  $\leq 0,1$  см<sup>3</sup>/мин и  $\pm 5$  % для утечек > 0,1 см<sup>3</sup>/мин.

В таблице 3.7 приведены значения объема воздуха, вытесняемого жидкостным поршнем при перемещении его в горизонтальной трубке на 1 мм. В таблицах 3.8 и 3.9 приведены значения перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке за 1 мин для затворов арматуры с условным диаметром DN 50 и 500 мм. Из таблиц 3.8 и 3.9 видно, что устройство с измерительной трубкой полностью удовлетворяет требованиям стандартов по измерению минимальных утечек газа по абсолютной величине и по допустимой погрешности измерений утечек для затворов трубопроводной арматуры.

Таблица 3.7 - Объем воздуха, вытесняемый жидкостным поршнем при перемещении в горизонтальной трубке на 1 мм

| Диаметр горизон-          | Объем воздуха, вытесняемый  | жидкостным порш- |
|---------------------------|-----------------------------|------------------|
| тальной трубки $d_{um}$ , | нем в трубке при перемещени | и на 1 мм:       |
| MM                        | CM <sup>3</sup>             | MM <sup>3</sup>  |
| 1,5                       | 0,00177                     | 1,77             |
| 2,0                       | 0,00314                     | 3,14             |
| 2,5                       | 0,00491                     | 4,91             |
| 3,0                       | 0,00707                     | 7,07             |
| 4,0                       | 0,0126                      | 12,60            |
| 6,0                       | 0,0283                      | 28,30            |
| 8,0                       | 0,0503                      | 50,30            |

Таблица 3.8 - Перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке за 1 мин для затворов арматуры DN =50 мм

| Классы герметичности                      | А             | В             | С           | D           |
|---|---------------|---------------|-------------|-------------|
| Максимально допустимые по ГОСТ            | Нет уте-      | 0,9           | 9,0         | 90,0        |
| 9544-93 [6] утечки воздуха для DN =50     | чек воз-      |               |             |             |
| мм, см <sup>3</sup> /мин                  | духа          |               |             |             |
| Погрешность измерения утечек воздуха      | $\pm 0,01$    | ±0,045        | ±0,45       | ±4,5        |
| по ГОСТ 9544-93 [6], см <sup>3</sup> /мин |               |               |             |             |
| Перемещение жидкостного поршня в          | -             | 287,0         | 714,0       | 3190        |
| горизонтальной трубке за 1 мин от уте-    |               | $(d_{um}=2$   | $(d_{um} =$ | $(d_{um} =$ |
| чек воздуха $L_m$ , мм                    |               | мм)           | 4 мм)       | 6 мм)       |
| Перемещение жидкостного поршня в          | ±3,2          | ±14,3         | ±35,7       | ±159        |
| горизонтальной трубке от допустимой       | $(d_{um} = 2$ | $(d_{um} = 2$ | $(d_{um} =$ | $(d_{um} =$ |
| погрешности измерений утечек воздуха,     | мм)           | MM)           | 4 мм)       | 6 мм)       |
| ММ  |               |               |             |             |

Таблица 3.9 - Перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке за 1 мин, для затворов арматуры DN = 500 мм

| Классы герметичности                      | Α             | В             | С           | D           |
|---|---------------|---------------|-------------|-------------|
| Максимально допустимые по ГОСТ            | Нет уте-      | 9,0           | 90,0        | 900,0       |
| 9544-93 [6] утечки воздуха для DN =50     | чек воз-      |               |             |             |
| мм, см <sup>3</sup> /мин                  | духа          |               |             |             |
| Погрешность измерения утечек воздуха      | $\pm 0,01$    | ±0,45         | ±4,5        | ±45,0       |
| по ГОСТ 9544-93 [6], см <sup>3</sup> /мин |               |               |             |             |
| Перемещение жидкостного поршня в          | -             | 714,0         | 3190        | 31900       |
| горизонтальной трубке за 1 мин от уте-    |               | $(d_{um} = 4$ | $(d_{um} =$ | $(d_{um} =$ |
| чек воздуха через микрощели $L_m$ , мм    |               | мм)           | 6 мм)       | 6 мм)       |
| Перемещение жидкостного поршня в          | ±3,2          | ±35,7         | ±159        | ±1590       |
| горизонтальной трубке от допустимой       | $(d_{um} = 2$ | $(d_{um} = 4$ | $(d_{um} =$ | $(d_{um} =$ |
| погрешности измерений утечек воздуха,     | мм)           | мм)           | 6 мм)       | 6 мм)       |
| ММ  |               |               |             |             |

Однако, устройство с горизонтальной трубкой для испытаний затворов классов герметичности С и D особенно повышенных диаметров является слишком точным устройством с небольшим диапазоном измерений утечек воздуха. Поэтому испытания затворов классов герметичности С и D можно проводить с использованием горизонтальной трубки воздухом в течение 10-15 с или проводить испытания на воде, которые также допускаются ГОСТ 9544-93 [6].

#### 3.3.8 Время запаздывания перемещения жидкостного поршняв горизонтальной трубке при контроле герметичности изделий

Определение времени запаздывания при контроле герметичности изделий устройством с использованием горизонтальной трубки с жидкостным поршнем проводится на примере затворов трубопроводной арматуры классов герметичности A, B, C и D.

Для изделия, испытываемого на герметичность, как отмечалось в подпункте 3.3.4, уравнение состояния газа имеет вид  $P_2V_2 = m_2RT$ , в котором  $P_2$ ,  $V_2$  и  $m_2$  - соответственно давление газа, Па, в изделии, объем изделия, м<sup>3</sup>, и масса газа, находящегося в изделии, кг. В рассматриваемом выражении состояния газа принимаем объем одного изделия  $V_2$  без учета объема эталонной емкости  $V_1$  потому, что именно понижение давления в изделии, испытываемом на герметичность, вызывает перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке устройства для испытаний изделий.

При понижении давления в испытываемом изделии на  $\Delta P_2$  (рисунок 3.22) уравнение состояния газа для изделия 4 принимает вид

$$(P_2 - \Delta P_2)V_2 = (m_2 - \Delta m_2)RT.$$
(3.150)

Вычитая из (3.150) уравнение для установившегося состояния газа в изделии, получим

$$\Delta P_2 = \Delta m_2 R T / V_2 \,. \tag{3.151}$$

Так как плотность газа  $\rho_{z} = m/V$ , тогда  $\Delta m_{2} = \rho_{z} \cdot \Delta V_{2}$  и выражение (3.151) принимает вид

$$\Delta P_2 = \Delta V_2 \cdot \rho_c \cdot RT / V_2 , \qquad (3.152)$$

где  $\Delta V_2$  – уменьшение объема газа в изделии, м<sup>3</sup>, из-за того, что газ уходит в виде утечек из изделия в атмосферу и в результате давление в изделии понижается на  $\Delta P_2$ .

Понижение давления  $\Delta P_2$  в изделии должно быть таким, чтобы произошло смещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке. Это произойдет в том случае, если понижение давления  $\Delta P_2$  в изделии будет больше, чем давление от сил поверхностного натяжения жидкости в горизонтальной трубке, которое определяется по формуле Лапласа (3.3). После замены в этой формуле радиуса трубки *R* на диаметр измерительной трубки  $d_{um} \Delta P_n = 4\sigma/d_{um}$  с учетом выражения (3.152), получим

$$\frac{4\sigma}{d_{um}} < \frac{\Delta V_2 \cdot \rho_c \cdot RT}{V_2} \quad \text{или} \quad \Delta V_2 > \frac{4\sigma \cdot V_2}{d_{um} \cdot \rho_c \cdot RT}.$$
(3.153)

#### Численное значение

$$\Delta V_2 > \frac{4 \cdot 72, 5 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 11, 67 \cdot 293 \cdot 29, 27} = 1,45 \cdot 10^{-5} \,\mathrm{m}^3$$

для следующих значений:  $\sigma = 72,5 \cdot 10^{-3}$  H/м;  $V_2 = 10 \cdot 10^{-3}$  м;  $d_{um} = 2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>;  $\rho_c = 11,67$  кг/м<sup>3</sup> и  $RT = 293 \cdot 29,27$  м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>. Если диаметр измерительной трубки  $d_{um}$  равен  $6 \cdot 10^{-3}$  м, тогда  $\Delta V_2^1 > 0,48 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>, если  $d_{um}$  равен  $8 \cdot 10^{-3}$  м, тогда  $\Delta V_2^{11} > 0,36 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>.

Время запаздывания  $\tau_{um}$ , с, перемещения жидкостного поршня в измерительной трубке по отношениям к утечкам газа из изделия можно определить по соотношению

$$\tau_{um} = \Delta V_2 / Q_2 , \qquad (3.154)$$

где  $\Delta V_2$  – объем газа, который уходит в виде утечек из изделия в атмосферу, м<sup>3</sup>;

 $Q_2$  – объемный расход газа из изделия в виде утечек, м<sup>3</sup>/с.

Для арматуры класса герметичности А утечек сжатого воздуха согласно ГОСТ 9544-93 [6] из изделия не должно быть, но погрешность измерений утечек должна быть не более  $\pm 0,01$  см<sup>3</sup>/мин для утечек менее 0,1 см<sup>3</sup>/мин. Если принять минимально допустимые утечки, равные 0,1 см<sup>3</sup>/мин, тогда по соотношению (3.154) определяем, что  $\tau_A = \Delta V_2 / 0,1 \cdot 10^{-6} = 1,45 \cdot 10^{-5} / 10^{-7} = 145$  мин. Время запаздывания очень большое и не приемлемо для условий испытаний изделий на герметичность.

Для арматуры классов герметичности В, С и D и DN = 200 мм время запаздывания соответственно составляет: 241,0; 8,1 и 0,6 с. Из этих данных следует, что при испытаниях трубопроводной арматуры классов герметичности А и В время запаздывания очень большое и необходимо выбирать другой способ испытаний.

# 3.3.9 Динамические погрешности контроля герметичности изделий устройством с горизонтальной трубкой по утечкам газа

Одной из важнейших задач при проектировании устройств для испытаний изделий на герметичность является решение проблемного вопроса по определению динамической точности, то есть величин, которые характеризуют значение ошибки, например, при измерении расхода утечек газа из изделия при использовании горизонтальной трубки.

Согласно работе [62] динамическая ошибка вычисляется как разность между входной и выходной величинами. Выходная величина вычисляется через интеграл свертки входного сигнала устройства и импульсной переходной

функции. Путем разложения интеграла свертки в ряд Тейлора получено [63] выражение для динамической ошибки

$$\varepsilon_{\pi}(t) = C_0 x(t) + C_1 \cdot dx(t)/dt + C_2 \cdot d^2 x(t)/dt^2 + \dots + C_n/n! \cdot d^n x(t)/dt^n + \dots, \qquad (3.155)$$

где x(t),  $dx(t)/dt ... d^n x(t)/dt^n$  - соответственно входной сигнал в измерительное устройство и производные по времени от входного сигнала;

*C*<sub>0</sub>, *C*<sub>1</sub>, *C*<sub>2</sub>, *C*<sub>n</sub> – коэффициенты, которые вычисляются по следующим выражениям [63]:

$$C_0 = 1 - W(0);$$
  $C_1 = -\frac{dW(s)}{ds}|_{s=0};$   $C_n = \frac{d^n [1 - W(s)]}{ds^n}|_{s=0}.$  (3.156)

где W(s), W(0) – передаточная функция рассматриваемого измерительного устройства и значение передаточной функции при s = 0.

Расход газа через горизонтальную трубку относительно утечек газа из изделия определяется передаточной функцией (3.142), с учетом (3.143)

$$W_1(s) = \frac{G_1(s)}{G_2(s)} = \frac{k_{um}V_1RT}{(V_1 + V_2)} \cdot \frac{1}{V_1s + k_{um}RT}.$$
(3.157)

Из этого выражения определяем, что

$$C_0 = \frac{V_2}{(V_1 + V_2)}; \qquad C_1 = \frac{V_1^2}{k_{um}RT \cdot (V_1 + V_2)}.$$
(3.158)

Входной величиной рассматриваемой системы автоматизированного контроля герметичности изделий в соответствии с передаточной функцией (3.157) является величина  $G_2(t)$  – утечки газа из изделия в виде расхода газа через микрощели. Этот расход газа является мало изменяемой величиной за время испытаний. Принимая этот расход постоянной величиной, производные от него во времени, в этом случае, равны нулю и определение динамической ошибки по выражению (3.155) можно провести по первому слагаемому

$$\varepsilon_{\rm d}(t) = C_0 G_2(t) = \frac{V_2}{(V_1 + V_2)} G_2(t).$$

Из этого выражения следует важный для практики при выборе объема эталонной емкости вывод - чем больше объем эталонной емкости  $V_1$ , тем меньше динамическая погрешность контроля герметичности изделий.

Однако, при утечках газа из изделия при контроле герметичности давление газа в изделии постепенно понижается, а поэтому значение утечек также уменьшается со временем. Принимаем, что снижение расхода газа через микрощели изделия происходит во времени линейно, то есть,

$$G_2(t) = G_2(t) (1 - k_{cH}t)$$
 и  $G_2(t)/dt = -k_{cH}G_2(t),$ 

где  $k_{ch}$  – размерный коэффициент, учитывающий снижение утечек газа из изделия от снижения давления в изделии при испытаниях на герметичность, с<sup>-1</sup>.

В этом случае динамическая ошибка, в соответствии с формулой (3.155), определяется выражением

$$\varepsilon_{\mathrm{A}}(t) = C_0 G_2(t) + C_1 \cdot dG_2(t)/dt = \left[ \frac{V_2}{(V_1 + V_2)} (1 - \kappa_{c_{H}} \cdot t) - \frac{V_1^2 \cdot k_{c_{H}}}{(V_1 + V_2) \kappa_{um} RT} \right] G_2(t) . (3.159)$$

Из этого выражения следует, что при учете снижения расхода газа через микрощели изделия еще более существенную роль на снижение динамической погрешности оказывает увеличение объема эталонной емкости V<sub>1</sub>.

Максимально возможное отклонение измеряемого параметра (для расхода утечек) может быть определено теоретически, например, как решение задачи Булгакова о накоплениях отклонений или путем построения кривой накопления Булгакова по кривой переходного процесса рассматриваемого устройства измерений [63].

Построенная кривая накоплений отклонений Булгакова для устройства измерений утечек газа из изделия с использованием горизонтальной трубки фактически мало отличается от кривой переходного процесса потому, что переходный процесс изменяется апериодически к установившемуся положению.

# **3.3.10.** Оценка динамических погрешностей контроля герметичности изделий при изменении параметров устройства с горизонтальной трубкой

Параметры систем автоматизированного контроля герметичности изделий и параметры испытательной и окружающей среды в условиях эксплуатации изменяются, поэтому к основной динамической погрешности прибавляются дополнительные погрешности. Расчет дополнительных динамических погрешностей проводят, например, с использованием методов теории чувствительности [63].

Выходной сигнал измерительного устройства зависит от времени и определяется, например, как y(t) или  $G_1(t)$  для устройства с горизонтальной трубкой. Если один из параметров системы автоматизированного контроля герметичности отклоняется на величину  $\alpha$ , тогда выходной сигнал будет в виде функции  $y(t,\alpha)$ , которую представляют, разложив в ряд Тейлора по переменной  $\alpha$ . В работе [63] отмечается, что для практических задач достаточно ограничиться рассмотрением первых двух членов ряда Тейлора в следующем виде

$$y(t,\alpha) = y_0(t) + \frac{\partial y(t,\alpha)}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha=0} \cdot \alpha , \qquad (3.160)$$

где  $y_0(t)$  – изменение выходного сигнала устройства во времени при номинальных значениях параметров, то есть, когда  $\alpha = 0$ . Коэффициент при  $\alpha$  обозначается как  $z^1(t)$ , называется функцией чувствительности первого порядка и определяется по выражению

$$z^{1}(t) = \frac{\partial y(t,\alpha)}{\partial \alpha}|_{\alpha=0}.$$
(3.161)

Функция чувствительности первого порядка для конкретного измерительного устройства определяется по передаточной функции [63]

$$z^{1}(t) = L^{-1} \left\{ \frac{\partial W(p,\alpha)}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha=0} \cdot X(p) \right\}.$$
 (3.162)

Передаточная функция расхода газа через горизонтальную трубку относительно утечек газа из изделия, испытываемого на герметичность, определяется выражением (3.142).

В качестве примера определим функцию чувствительности для устройства с горизонтальной трубкой относительно утечек газа из изделия при изменении постоянной времени  $T_{um}$  для различных проводимостей горизонтальной трубки, которая, в основном, зависит от диаметра трубки, и объема эталонной емкости. Принимаем, что постоянная времени  $T_{um}$  может изменяться на  $\alpha_{um}$  и передаточная функция (3.142) принимает вид

$$W_{1um}(s) = \frac{G_1(s)}{G_2(s)} = \frac{V_1}{(V_1 + V_2)} \cdot \frac{1}{(T_{um} + \alpha_{um})s + 1}$$

Если входным сигналом устройства является единичная функция  $G_2(s) = 1/s$ , тогда получим функцию чувствительности первого порядка согласно выражению (3.162) для устройства с горизонтальной трубкой

$$z^{1}(t) = L^{-1} \left\{ \frac{\partial}{\partial \alpha} \frac{V_{1}}{(V_{1} + V_{2})} \cdot \frac{1}{(T_{um} + \alpha_{um})s + 1} \Big|_{\alpha = 0} \cdot \frac{1}{s} \right\} = \frac{V_{1}}{(V_{1} + V_{2})} L^{-1} \left[ -\frac{1}{T_{um}} \cdot \frac{1}{(s + 1/T_{um})^{2}} \right] = \frac{V_{1}}{T_{um}} \frac{V_{1}}{(V_{1} + V_{2})} \cdot e^{-\frac{t}{T_{um}}}$$
(3.163)

Делаем подстановку в формулу (3.160) в качестве первого слагаемого выражение из формулы (3.144), с учетом (3.143), которое представляет выходной сигнал при номинальном значении постоянной времени  $T_{um}$ , а во второе слагаемого делаем подстановку функции чувствительности первого порядка из формулы (3.163)

$$G_{01}(t,\alpha_{um}) = \frac{V_1}{(V_1 + V_2)} \left( 1 - e^{-\frac{k_{um}RT}{V_1} \cdot t} \right) - \frac{V_1 \cdot t \cdot \alpha_{um}}{T_{um}(V_1 + V_2)} \cdot e^{-\frac{t}{T_{um}}} = \frac{V_1}{(V_1 + V_2)} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\alpha_{um}t}{T_{um}} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_{um}}} \right].$$
(3.164)

По формуле (3.164) проведены расчеты для горизонтальных трубок систем испытаний диаметром 2; 4; 6 и 8 мм при отклонении постоянной времени от номинального значения для каждого из рассматриваемых диаметров трубок в соответствии с таблицей 3.10, которые приведены на рисунках 3.28 и 3.29.

Как показывают проведенные расчеты, изменение постоянной времени зависит от диаметра горизонтальной трубки и оказывает влияние в различной степени. Для трубки диаметром 8 мм изменение постоянной времени в два раза (на 100 %) по сравнению с исходным значением не изменяет кривой переходного процесса (таблица 3.11).

Для горизонтальной трубки диаметром 6 мм (рисунок 3.28) изменение постоянной времени до 20 % приводит к незначительному увеличению запаздывания (до 5 с). Для трубки диаметром 4 мм (рисунок 3.29) изменение постоянной времени до 20 % приводит к увеличению запаздывания до 400 с. Таблица 3.10 - Значения диаметров горизонтальных трубок, постоянных времени и отклонений постоянных времени от номинальных значений при расчетах погрешностей, вносимых изменением постоянной времени

| Диаметр го-   | Постоянная   | Отклонени  | я постоян-                   | Результаты расче-                   |
|---------------|--------------|------------|------------------------------|-------------------------------------|
| ризонталь-    | времени для  | ной времен | ни $T_{um}$ на $\alpha_{um}$ | тов представлены                    |
| ной трубки    | устройства   | 0/         | Значение                     | на рисунке или в                    |
| $d_{um}$ , мм | $T_{um}$ , c | 70         |                              | таблице                             |
| 4             | 46,2         | 0          | 0                            | Кривые на рисунке                   |
|               |              | 0,1        | 0,0462                       | 3.28: $1 - \alpha_{um} = 0$ ; 2-    |
|               |              | 0,2        | 0,0924                       | $\alpha_{um} = 0,1$ % or $T_{um}$ ; |
|               |              | 2,0        | 0,924                        | $3 - \alpha_{um} = 2,0$ % ot        |
|               |              | 20,0       | 9,24                         | $T_{um}; 4 - \alpha_{um} = 20,0$    |
|               |              | · ·        |                              | % от <i>Т<sub>ит</sub></i>          |
| 6             | 2,71         | 0          | 0                            | Кривые на рисунке                   |
|               |              | 0,2        | 0,00542                      | 3.29: $1 - \alpha_{um} = 0; 2$      |
|               |              | 2,0        | 0,0542                       | $-\alpha_{um} = 2$ % or $T_{um}$ ;  |
|               |              | 20,0       | 0,542                        | $3 - \alpha_{um} = 20,0$ % ot       |
|               |              |            |                              | T <sub>um</sub>                     |
| 8             | 0,08         | 0          | 0                            | В таблице 3.11                      |
|               |              | 2,0        | 0,0016                       |                                     |
|               |              | 20,0       | 0,016                        |                                     |
|               |              | 100,0      | 0,08                         |                                     |

Таблица 3.11 - Изменение выходного сигнала устройства с горизонтальной трубкой диаметром 8 мм в зависимости от времени и отклонения постоянной времени  $\alpha_{um}$ , %, от принятого значения  $T_{um}$ 

| Время <i>t</i> , с | Изменение выходного сигнала устройства с горизонтальной трубкой диаметром 8 мм $h(t) \Rightarrow G_1(t)$ в зависимости от времени при следующих отклонениях постоянной време- |      |      |       |  |  |
|--------------------|---|------|------|-------|--|--|
|                    | ни $\alpha_{um}$ , $\gamma_0$ , от принятого значения $I_{um}$ :  |      |      |       |  |  |
|                    | 0,0   | 2,0  | 20,0 | 100,0 |  |  |
| 0                  | 0   | 0    | 0    | 0     |  |  |
| 0,05               | 0,42  | 0,42 | 0,41 | 0,39  |  |  |
| 0,1                | 0,67  | 0,67 | 0,65 | 0,63  |  |  |
| 0,2                | 0,83  | 0,83 | 0,81 | 0,79  |  |  |
| 0,3                | 0,89  | 0,89 | 0,88 | 0,85  |  |  |
| 0,5                | 0,91  | 0,91 | 0,91 | 0,90  |  |  |



Рисунок 3.28 - Переходные характеристики устройства с горизонтальной трубкой диаметром 6 мм при измерении утечек газа из изделия и отклонении постоянной времени от номинального значения



Рисунок 3.29 - Переходные характеристики устройства с горизонтальной трубкой диаметром 4 мм при контроле утечек газа из изделия и отклонении постоянной времени от номинального значения

При использовании горизонтальной трубки диаметром 2 мм отклонение постоянной времени на 0,2 % от исходного значения приводит к запаздыванию
выше 100 с. Это связано с тем, что объем эталонной емкости принимается от 0,5 до 1 м<sup>3</sup>, а гидравлическое сопротивление горизонтальной трубки диаметром 2 мм большое.

#### 3.3.11 Определение объема утечек газа из изделия, которые вызывают ют начальное движение жидкостного поршня в горизонтальной трубке, преодолевая силы поверхностного натяжения жидкости

В изделии 4 объемом  $V_2$ ,  $M^3$ , (рисунок 3.22) в начальном состоянии при контроле герметичности давление газа равно  $P_2$ , Па, и уравнение состояния газа [69] имеет вид  $P_2V_2 = m_2RT$ , где  $m_2$  – масса газа в изделии, кг, R – газовая постоянная газа (сжатого воздуха),  $M^2c^{-2}K^{-1}$ , T – абсолютная температура газа (сжатого воздуха) в изделии, К.

Если из изделия в виде утечек уходит масса газа  $\Delta m_2$ , кг, необходимая для начального перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, тогда давление газа в изделии, при том же объеме изделия  $V_2$ , м<sup>3</sup>, понизится на  $\Delta P_2$ , Па, которое равно  $\Delta P_n$  – давлению, Па, возникающему в горизонтальной трубке от воздействия сил поверхностного натяжения жидкости, определяемого по формуле Лапласа.

В этом случае уравнение состояния газа в изделии принимает вид

$$(P_2 - \Delta P_n) V_2 = (m_2 - \Delta m_2)RT.$$

Если из этого выражения вычесть исходное уравнение состояния газа и разделить обе части выражения на плотность газа  $\rho_{2}$ , кг/м<sup>3</sup>, тогда

$$\Delta V_{ym_4} = \frac{\Delta P_n \cdot V_2}{\rho_2 RT}, \qquad (3.165)$$

где  $\Delta V_{ymu}$  – объем утечек газа из изделия, м<sup>3</sup>,  $\Delta V_{ymu} = \Delta m_2 / \rho_2$ .

Как отмечалось в п. 3.3.2, если выбрать диаметр горизонтальной трубки  $d_{um} = 4$  мм, тогда потери давления на перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке, то есть, на преодоление сил поверхностного натяжения жидкости в трубке при использовании в трубке воды составят 72,5 Па, а при использовании ртути – 487,0 Па.

При использовании горизонтальной трубки  $d_{um} = 4$  мм с водяным поршнем из выражения (3.165) получим при R = 29,27 м<sup>2</sup>с<sup>-2</sup>К<sup>-1</sup>; T = 293 K;  $\rho_{2} = 1,27$  кг/м<sup>3</sup>, что

$$\Delta V_{ymy} = \frac{72,5 \cdot V_2}{1,27 \cdot 293 \cdot 29,27} = 0,00666 \cdot V_2 \text{ M}^3.$$

На рисунке 3.30 приведены построенные по выражению (3.165) графики измеряемых и неизмеряемых значений утечек газа из изделия в зависимости от

объема изделия (объемом до  $0,1 \text{ м}^3$  и размерами до  $0,5 \cdot 0,4 \cdot 0,5 \text{ м}$ ) при измерении утечек газа горизонтальной трубкой диаметром 3 мм (прямая 1) и 4 мм (прямая 2) с водяным поршнем.

Кривая 3 на рисунке 3.30 отражает возможное повышение коэффициента чувствительности при контроле герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки, измеряющей с точностью 0,0252 см<sup>3</sup> ( $\pm$  0,0126 см<sup>3</sup> в соответствии с таблицей 3.7).



Рисунок 3.30 – Изменение измеряемых и неизмеряемых значений утечек газа из изделия в зависимости от объема изделия при измерении утечек газа горизонтальной трубкой диаметром 3 мм (прямая 1) и 4 мм (прямая 2) с водяным поршнем, а также возможное повышение коэффициента чувствительности (кривая 3) при использовании горизонтальной трубки с точностью измерений, равной 0,0252 см<sup>3</sup>

Например, для изделия объемом 0,08 м<sup>3</sup> (рисунок 3.30) объем утечек неизмеряемых горизонтальной трубкой диаметром 4 мм, составляет 600 см<sup>3</sup>. В этом случае коэффициент повышения чувствительности может составить (при периодических возмущениях давления пробной среды)  $\kappa_{nog.uygcmg.} = 600/0,0252 = 23809,5$ .

Таким образом, установлено выражение для определения объема утечек газа, которые должны выйти из изделия, чтобы происходило начальное движение жидкостного поршня в горизонтальной трубке, преодолевая силы поверхностного натяжения жидкости, в зависимости от объема изделия.

Эти данные и выше приведенные общие теоретические положения показывают, что устройства контроля герметичности с использованием горизонтальной трубки не обеспечивают контроль герметичности изделий классов А и В из-за большого значения зоны нечувствительности перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке от приложенного к поршню перепада давлений.

### 3.3.12 Испытания на герметичность изделий устройством с горизонтальной трубкой с жидкостным поршнем и гидравлическим затвором

Устройство для испытаний на герметичность изделий с использованием горизонтальной трубки с жидкостным поршнем и гидравлическим затвором представлено на рисунке 3.31 и состоит из эталонной емкости 1, изделия 2, испытываемого на герметичность, гидравлического затвора, содержащего герметичную емкость 3, частично заполненную жидкостью, с двумя трубками 4 и 5, и горизонтальной трубки 6 с жидкостным поршнем 7.



Рисунок 3.31 - Схема устройства испытаний на герметичность изделий с использованием горизонтальной трубки с жидкостным поршнем и гидравлического затвора

Трубки 4 и 5 гидравлического затвора, жестко соединенные с горизонтальной трубкой 6, установлены на неподвижной опоре 8 и поворотном шарнире 9. Одна из этих трубок присоединяется к эталонной емкости, а другая к изделию с помощью гибких трубопроводов 10 и 11.

Перемещение жидкостного поршня 7 в горизонтальной трубке 6 воспринимается измерительным преобразователем 16 и регистрируется прибором 17. Устройство, изображенное на рисунке 3.31, работает следующим образом. Вначале гидравлический затвор, трубки 4 и 5 и горизонтальную трубку 6 с жидкостным поршнем наклоняют путем поворота вокруг шарнира 9 на угол, при котором нижние концы трубок 4 и 5 полностью выходят из жидкости, находящейся в герметичной емкости 3 гидрозатвора. К гидравлическому затвору с горизонтальной трубкой и жидкостным поршнем присоединяют эталонную емкость 1 и изделие 2 с помощью гибких трубопроводов 10 и 11. Открывают вентили 12 и 13 и устройство заполняют пробным газом от источника 14 до заданного давления.

После этого прекращают подвод пробного газа путем перекрытия вентиля 12, а гидравлический затвор с горизонтальной трубкой устанавливают в горизонтальное положение на опору 8. При этом нижние концы трубок 4 и 5 погружаются в жидкость, находящуюся в емкости 3, и разъединяют эталонную емкость от изделия по участку, проходящему через трубки 4 и 5. Испытывают изделие на герметичность в течение заданного промежутка времени. О герметичности изделия делают заключение по показаниям прибора 17.

## 3.4 Метод автоматизированного контроля герметичности изделий при периодических возмущениях давления пробной среды

# **3.4.1** Дифференциальное уравнение движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке

Вывод дифференциального уравнения движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке рассмотрен применительно к устройству испытаний изделий, упрощенная схема которого приведена на рисунке 3.22.

Известно [61] выражение для модуля упругости среды E, МПа, в зависимости от объема изделия  $V_1$  и изменения объема среды в изделии от изменения давления  $dP_1/dV_1$ , МПа/м<sup>3</sup>,

$$E = \left( dP_1 / dV_1 \right) V_1.$$

Применительно к рисунку 3.22 объем изделия и половины горизонтальной трубки обозначим  $V_2$ , а давление газа в изделии  $P_2$ . Изменение объема газа в изделии от движения жидкостного поршня  $\Delta V_2$  равен  $\Delta V_{mp}$  – изменению объема газа в горизонтальной трубке от движения жидкостного поршня, м<sup>3</sup>. При этом  $\Delta V_{mp} = F_{mp} \cdot \Delta x(t)$ , где  $\Delta x(t)$  - перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке, м,  $F_{mp} = \pi d^2/4$  - площадь сечения трубки, м<sup>2</sup>, диаметром *d*. В этом случае выражение модуля упругости принимает вид

$$E_{z} = \frac{\Delta P_{2}(t)}{F_{mp}\Delta x(t)} \cdot V_{2},$$

где Е<sub>г</sub> - модуль упругости газа, МПа;

 $\Delta P_2(t)$  - изменение давления газа в изделии, МПа;

Умножив правую и левую части этого выражения на площадь сечения трубки  $F_{mp}$ , получим

$$\Delta P_2(t) \cdot F_{mp} = \frac{E_z F_{mp}^2}{V_2} \Delta x(t) \quad \text{или} \qquad N_{yn}(t) = \frac{E_z F_{mp}^2}{V_2} x(t), \qquad (3.166)$$

где  $N_{yn}(t) = P_2(t) \cdot F_{mp}$  – сила, которую преодолевает жидкостный поршень при движении в горизонтальной трубке от упругости газа в изделии, Н.

При движении жидкостного поршня, например, вправо (рисунок 3.22), он вытесняет часть газа из трубки в изделие и поднимает давление  $P_2$  в изделии. Сила, создаваемая движением жидкостного поршня, аналогична действию пружины, если бы она была установлена в горизонтальной трубке и сжималась при движении поршня.

Допустим, что на жидкостный поршень с левой стороны (рисунок3.22) действует сила  $N_1$ , которая уравновешивается силой от давления в изделии, равном  $P_2$ , то есть,  $N_1=P_2 F_{mp}$ , где  $F_{mp}$ -площадь сечения трубки.

Чтобы давление в изделии достигло значения  $P_2 + \Delta P_2^1(t)$ , необходимо к жидкостному поршню приложить силу  $N_1 + \Delta N_1(t) - N_{\sigma}$ , где  $N_{\sigma}$  - сила от действия поверхностного натяжения жидкости на жидкостный поршень в трубке, которую необходимо преодолеть до начала движения жидкостного поршня. Сила  $N_1 + \Delta N_1(t) - N_{\sigma} = [P_2 + \Delta P_2^1(t)] F_{mp}$ . Вычитая из этого выражение соотношение для силы  $N_1$ , получим  $\Delta N_1(t) - N_{\sigma} = \Delta P_2^1(t) F_{mp}$ .

Состояние газа в изделии 2 определяется по уравнению Клапейрона – Менделеева  $P_2V_2 = m_2RT$ . Если сила  $N_1$  возрастает до значения  $N_1 - N_\sigma + \Delta N_1(t)$ , тогда давление газа в изделии возрастает до  $P_2 + \Delta P_2^1(t)$ , масса газа  $m_2$  остается той же, а объем пространства, в котором находится газ, уменьшается до  $V_2$ - $\Delta V_2(t)$  (из-за перемещения жидкостного поршня), и уравнение состояния газа принимает вид  $[P_2 + \Delta P_2^1(t)] [V_2 - \Delta V_2(t) = m_2RT$ . Из этого выражения после замены  $P_2V_2 = m_2RT$ ,  $V_2 = m_2RT/P_2$  и  $\Delta V_2(t) = F_{mp} \cdot \Delta x(t)$ , где  $\Delta x(t)$  - перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке, м,  $F_{mp}$  - площадь сечения трубки, получим

$$\Delta x(t) = \frac{V_2}{F_{mp} \left[ P_2 + \Delta P_2^1(t) \right]} \Delta P_2^1(t) \,.$$

После умножения обеих частей этого выражения на площадь сечения горизонтальной трубки  $F_{mp}$ , пренебрегая в знаменателе этого выражения  $\Delta P_2^1(t)$ , как величиной второго порядка малости по отношению к  $P_2$ , получим

$$\Delta P_2^{1}(t) \cdot F_{mp} = \frac{P_2 \cdot F_{mp}^2}{V_2} \Delta x(t) \quad \text{или} \quad N_{\Delta P}(t) = \frac{P_2 F_{mp}^2}{V_2} x(t), \quad (3.167)$$

где  $N_{\Delta P}(t) = \Delta P_2^1(t) \cdot F_{mp}$  – сила, которую преодолевает жидкостный поршень при движении в горизонтальной трубке, поднимая давление в изделии своим движением, H.

Выражения (3.166) и (3.167) описывают влияние одного и того же явления на движение жидкостного поршня, поэтому в дальнейших положениях будет приниматься одно из этих выражений.

Силу  $N_{\sigma}$ , H, от действия поверхностного натяжения жидкости на жидкостный поршень в горизонтальной трубке определим на основании формулы Лапласа  $\Delta P_n = 2\sigma/R$ , где  $\Delta P_n$  - давление, возникающее в трубке от поверхностного натяжения жидкости, Па;  $\sigma$  - поверхностное натяжение жидкости, H/м; *R* радиус трубки, м, умножая обе части ее на площадь трубки,

$$\Delta P_{\pi} \cdot F_{mp} = \frac{4\sigma}{d_{mp}} \cdot F_{mp} \quad \text{или} \quad N_{\sigma} = \Delta P_{\pi} \cdot F_{mp} = \pi \cdot \sigma \cdot d_{mp}. \quad (3.168)$$

Сила жидкостного трения  $N_{\mathcal{M}.mp}(t)$  при движении жидкостного поршня в горизонтальной трубке определяется по формуле (3.126), после подстановки в нее выражения (3.132) и замены скорости перемещения жидкостного поршня  $V_{cp}$  на dx(t)/dt,

$$N_{\mathcal{H}.mp}(t) = 32\pi \cdot \mu \cdot l \cdot \frac{dx(t)}{dt}$$
 или  $N_{\mathcal{H}.mp}(t) = k_{\mathcal{L}.mp} \cdot \frac{dx(t)}{dt}$ , (3.169)

где  $\kappa_{2.mp} = 32 \ \pi \mu l$  – размерный коэффициент гидравлического трения при перемещении жидкостного поршня в трубке, H·c/м.

Дифференциальное уравнение движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке применительно к устройству для испытаний изделий на герметичность (рисунок 3.22) с учетом инерционных сил движения жидкостного поршня в трубке и сил по выражениям (3.166) и (3.169), обозначая объем изделия  $V_2 = V_{u_3}$ , принимает вид

$$m\frac{d^{2}x(t)}{dt^{2}} + \kappa_{e.mp}\frac{dx(t)}{dt} + \frac{E_{e}F_{mp}^{2}}{V_{u3}}x(t) + \left[N_{\Delta P}(t) - N_{\sigma}\right] = \left[P_{1}(t) - P_{2}(t)\right] \cdot F_{mp},$$

где *т* - масса жидкостного поршня в горизонтальной трубке, кг;

 $P_1(t)$ ;  $P_2(t)$ - давление газа, приложенное к поршню горизонтальной трубки с двух сторон, соответственно со стороны эталонной емкости и изделия, МПа.

Если разность давлений  $P_1(t)$  и  $P_2(t)$  представить как  $\Delta P_2(t)$ , тогда

$$m\frac{d^{2}x(t)}{dt^{2}} + \kappa_{e.mp}\frac{dx(t)}{dt} + \frac{E_{e}F_{mp}^{2}}{V_{u3}}x(t) + [N_{\Delta P}(t) - N_{\sigma}] = \Delta P_{2}(t) \cdot F_{mp}.$$
 (3.170)

Исследование движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке устройств контроля герметичности изделий при периодических возмущениях давления пробной среды проводится с использованием метода фазовых траекторий.

Метод фазовых траекторий введен в теорию автоматического управления А.А. Андроновым для исследования движения нелинейных систем и для учета таких факторов, как сухое трение, люфты в кинематических парах. В работе метод фазовых траекторий используется для исследования движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, на который воздействуют:

- силы поверхностного натяжения жидкости между жидкостным поршнем и внутренними стенками горизонтальной трубки и

- силы вязкого трения (жидкостного трения) в ламинарном пограничном слое горизонтальной трубки от воздействия касательных напряжений в жидкости возле стенки трубки.

Дифференциальное уравнение движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке (3.170) применительно к устройству для испытаний изделий на герметичность (рисунок 3.22) с учетом инерционных сил движения жидкостного поршня, сил упругости газа в изделии и эталонной емкости и сил жидкостного трения, заменяя  $[N_{\Delta P}(t) - N_{\sigma}] = N_{H/\pi}[N_{\sigma}]$ , принимает вид

$$m\frac{d^{2}x(t)}{dt^{2}} + \kappa_{z.mp}\frac{dx(t)}{dt} + \frac{E_{z}F_{mp}^{2}}{V_{u3}}x(t) + N_{H/\pi}[N_{\sigma}] = \Delta P_{2}(t) \cdot F_{mp}, \qquad (3.171)$$

где  $N_{\mu/\pi}[N_{\sigma}]$  - нелинейная сила в дифференциальном уравнении движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке от действия поверхностного натяжения жидкости, H, которую определим по выражениям, аналогичным для силы сухого трения [75],

$$N_{H/\Lambda}[N_{\sigma}] = \begin{vmatrix} N_{\sigma} & \text{при } x(t) > 0; \\ N_{\sigma} & \text{при } x(t) < 0; \\ -N_{\sigma} \le N_{H/\Lambda}[N_{\sigma}] \le N_{\sigma} & \text{при } x(t) = 0. \end{cases}$$
(3.172)

Выражения (3.172) представлены на рисунке 3.32.



Рисунок 3.32 – Нелинейная характеристика, построенная по выражению (3.172)

Из выражений (3.171) и (3.172) с учетом записи подобных выражений в работе [75] получим:

$$m\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \kappa_{z.mp} \frac{dx(t)}{dt} + \frac{E_z F_{mp}^2}{V_{u3}} x(t) + N_\sigma Sign \ x(t) = \Delta P_2(t) F_{mp} \quad \text{при} \quad x(t) \neq 0$$

ИЛИ

при 
$$x(t) = 0$$
 и  $|\Delta P_2(t)|F_{mp} > N_{\sigma};$  (3.173)

x = const при  $\dot{x}(t) = 0$  и  $|\Delta P_2(t)|F_{mp} < N_{\sigma}$ .

Уравнения (3.173) описывают движение жидкостного поршня в горизонтальной трубке в одну и другую стороны.

### **3.4.2 Исследование передаточной функции движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке**

После преобразования по Лапласу уравнения (3.171) с учетом (3.172) получим

$$\left(ms^{2} + \kappa_{e,mp}s + \frac{E_{e}F_{mp}^{2}}{V_{u3}}\right)x(s) = \Delta P_{2}(s)F_{mp} \mp N_{\sigma} \qquad \text{при } x(t) \neq 0$$

Передаточная функция из этого выражения

$$W_{x/\Delta N}(s) = \frac{x(s)}{\Delta P_2(s)F_{mp} \mp N_{\sigma}} = \frac{V_{u3}}{E_z F_{mp}^2} \cdot \frac{1}{\frac{mV_{u3}}{E_z F_{mp}^2} s^2 + \frac{k_{z,mp}V_{u3}}{E_z F_{mp}^2} s + 1} = \frac{V_{u3}}{E_z F_{mp}^2} (T^2 s^2 + 2\xi T s + 1), \quad (3.174)$$

где <br/> Tи  $\xi$  - постоянная времени, с, и коэффициент демпфирования, определяемые по выражениям

$$T = \frac{1}{F_{mp}} \sqrt{\frac{mV_{u3}}{E_2}},$$
 (3.175)

$$\xi = \frac{k_{z.mp}}{2F_{mp}} \sqrt{\frac{V_{u3}}{mE_z}}.$$
(3.176)

Определим значения *T* и  $\xi$  для двух различных диаметров горизонтальной трубки и двух объемов испытываемых на герметичность изделий. Для горизонтальной трубки диаметром  $d_{mp} = 4 \cdot 10^{-3}$  м, изделия объемом  $V_{u3} = 0,4\cdot0,4\cdot0,2$  м<sup>3</sup> = 0,032 м<sup>3</sup>, длины жидкостного поршня в горизонтальной трубке  $l_{nopul} = 15\cdot10^{-3}$  м, плотности жидкости (воды)  $\rho = 998$  кг/м<sup>3</sup>, динамической вязкости жидкости (воды)  $\mu = 1,05\cdot10^{-3}$  Н·с/м<sup>2</sup> и модуля упругости газа (воздуха)  $E_{z} = 0,127\cdot10^{6}$  Па получим, что постоянная времени T = 0,546 с и  $\xi = 2,29$ .

Для горизонтальной трубки диаметром  $d_{mp} = 6 \cdot 10^{-3}$  м, изделия объемом  $V_{u3} = 0,2 \cdot 0,2 \cdot 0,1$  м<sup>3</sup> = 0,004 м<sup>3</sup>, длины жидкостного поршня в горизонтальной трубке  $l_{nopul} = 50 \cdot 10^{-3}$  м, плотности жидкости  $\rho = 998$  кг/м<sup>3</sup>, динамической вязкости жидкости  $\mu = 1,05 \cdot 10^{-3}$  Н·с/м<sup>2</sup> и модуля упругости газа (воздуха)  $E_{z} = 0,127 \cdot 10^{6}$  Па получим, что постоянная времени T = 0,235 с и  $\zeta = 0,440$ .

Характеристическое уравнение движение жидкостного поршня в трубке в соответствии с передаточной функцией (3.174) после введения обозначений:  $E_2 F_{mp}^2 / mV_{u3} = \omega_0^2$ , [ $\omega_0$  – частота, с<sup>-1</sup>, и, учитывая (3.175), получим, что  $\omega_0 = 1/T$ , где *T* – постоянная времени, с],  $\kappa_{2.mp} / m = 2\beta$  ( $\beta$  – коэффициент демпфирования, с<sup>-1</sup>) принимает вид

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2\beta \cdot \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(t) = 0.$$
 (3.177)

Из выражения  $\kappa_{2.mp}/m = 2\beta$ , с учетом формул (3.175) и (3.176), получим  $\beta = \xi/T$ . Согласно выше приведенным расчетам для устройства с горизонтальной трубкой как колебательного звена T = 0,235 с,  $\xi = 0,440$ . В этом случае  $\omega_0 = 4,255$ ;  $\beta = 1,872$  с<sup>-1</sup>. Корни характеристического уравнения (3.177) имеют следующие значения:  $\lambda_{1,2} = -1,872 \pm 3,821$ i.

Если корни комплексные, тогда решение уравнения (3.177) [76], представляемого как  $a_0 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dx(t)}{dt} + a_2(t) = 0$ , имеет вид

$$x(t) = e^{\sigma t} (A \cos \omega t + B \sin \omega t),$$

где 
$$\sigma = -\frac{a_1}{2a_0} = -\frac{2\beta}{2} = -\beta;$$
  $\omega = \frac{\sqrt{4a_0a_2 - a_1^2}}{2a_0} = \frac{\sqrt{4\omega_0^2 - 2\beta}}{2}$ 

Коэффициенты *A* и *B* определяются по начальным или краевым условиям. Принимая, что при t = 0  $x(t) = x(0) = x_0$  и dx(t)/dt = dx(0)/dt = 0, определяем, что  $A = x_0$ ;  $B = -\sigma x_0/\omega$ . Решение уравнения (3.177) принимает вид

$$x(t) = x_0 e^{-\beta t} \left( \cos \omega t + \frac{\beta}{\omega} \sin \omega t \right)$$
(3.178)

или после подстановки численных значений коэффициентов

$$x(t) = x_0 e^{-1,872t} (0,452\sin 4,14t + \cos 4,14t).$$
(3.179)

Введем обозначение dx(t)/dt = y(t) и определим y(t) из выражения (3.178)

$$y(t) = -x_0 e^{-\beta t} \left( \frac{\beta^2}{\omega} + \omega \right) \sin \omega t \qquad (3.180)$$

или после подстановки численных значений

$$y(t) = -4,986 x_0 e^{-1,872 t} \sin 4,14 t$$
. (3.181)

Вычисленные значения x(t) и y(t) по выражениям (3.179) и (3.181) при  $x_0 = 100$  мм и  $\beta = 1,872$  с<sup>-1</sup> приведены в таблице 3.12 и на рисунке 3.33 (кривая 1). Таблица 3.12

| t,c         | 0      | <i>t</i> = 0,38 | <i>t</i> = 0,76 | <i>t</i> = 1,14 | <i>t</i> = 1,51 |
|-------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| x(t)        | +100,0 | 20,2            | -24,1           | -5,4            | 5,9             |
| <i>y(t)</i> | 0      | -244,6          | 0               | 58,9            | 0               |

Для устройства контроля герметичности изделий с горизонтальной трубкой как апериодического звена второго порядка T = 0,546 с,  $\xi = 2,29$ . В этом случае  $\omega_0 = 1,182$  1/с;  $\beta = 4,194$  с<sup>-1</sup>. Корни характеристического уравнения (3.177) имеют следующие значения:  $\lambda_1 = -8,218$ ;  $\lambda_2 = -0,17$ .

Решение уравнения (3.177) [76], представляемого как  $a_0 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dx(t)}{dt} + a_2(t) = 0$ , имеет вид  $x(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}$ . Принимая, что при t = 0  $x(t) = x(0) = x_0$  и dx(t)/dt = dx(0)/dt = 0, определяем, что  $C_1 = x_0 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$  и  $C_2 = -x_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$ . Решение принимает вид

$$x(t) = x_0 \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{\lambda_2 t} \right)$$
(3.182)

или после подстановки численных значений

$$x(t) = x_0 \left( 1,021 \, e^{-0.17 \, t} - 0,021 \, e^{-8,218 \, t} \right). \tag{3.183}$$

Введем обозначение dx(t)/dt = y(t) и определим y(t) из выражения (3.182)

$$y(t) = \frac{x_0 \lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \left( e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t} \right)$$
(3.184)

или после подстановки численных значений

$$y(t) = 0,174 \ x_0 \left( e^{-8,218 \ t} - e^{-0,17 \ t} \right). \tag{3.185}$$



кривая 1 - при  $\xi = 0,440$ , T = 0,235 с,  $\beta = 1,872$  с<sup>-1</sup>; кривая 3 - при  $\xi = 0,035$ , T = 0,235 с,  $\beta = 0,15$  с<sup>-1</sup>; кривая 4- при  $\xi = 0$ , T = 0,235 с,  $\beta = 0$  с<sup>-1</sup>; б) как апериодического звена второго порядка – кривая 2 - при  $\xi = 2,29$ , T = 0,546 с,  $\beta = 4,194$  с<sup>-1</sup>

Рисунок 3.33 - Фазовые траектории, построенные по характеристическому уравнению передаточной функции движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке устройства контроля герметичности изделий: а) как колебательного звена

Вычисленные значения x(t) и y(t) по выражениям (3.183) и (3.185) при  $x_0$  = 100 мм приведены в таблице 3.13 и на рисунке 3.33 (кривая 2).

| <i>t</i> , c     | 0     | 0,38   | 0,76   | 1,52   | 3,04   | 6,05  | 12,10 | 36,30 |
|------------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| <i>x(t),</i> мм  | 100,0 | 95,60  | 89,72  | 78,98  | 59,80  | 35,75 | 12,78 | 0,21  |
| <i>y(t)</i> , мм | 0     | -15,54 | -15,29 | -13,46 | -10,40 | -6,22 | -2,22 | -0,04 |

Таблица 3.13

Если коэффициент демпфирования  $\xi = 0,035$  и постоянная времени T = 0,235 с, тогда коэффициент  $\beta = 0,15$  с<sup>-1</sup> и выражения (3.178) и (3.180) принимают вид:

$$x(t) = x_0 e^{-0.15t} (0.036 \sin 4.14t + \cos 4.14t);$$

$$y(t) = -4,14 x_0 e^{-0,15 t} \sin 4,14 t$$
.

Вычисленные значения x(t) и y(t) по этим выражениям при  $x_0 = 100$  мм приведены в таблице 3.14 и на рисунке 3.33 (кривая 3).

| таолица э.14 | Таблица | 3 | .14 |
|--------------|---------|---|-----|
|--------------|---------|---|-----|

| <i>t</i> , c     | 0     | 0,38   | 0,76   | 1,14  | 1,52  | 1,90   | 2,28  | 2,65  |
|------------------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| x(t), MM         | 100,0 | 3,17   | -89,24 | -2,43 | 79,60 | 1,80   | -71,1 | -4,10 |
| <i>у(t)</i> , мм | 0     | -392,0 | 0      | 349,8 | 0     | -312,1 | 0     | 278,8 |

Если коэффициент демпфирования  $\xi = 0$  и T = 0, 235 с, тогда  $\beta = 0$  с<sup>-1</sup> и выражения (3.178) и (3.180) принимают вид:

$$x(t) = x_0 \cos 4.14t;$$
  $y(t) = -4.14 x_0 \sin 4.14t.$ 

Вычисленные значения x(t) и y(t) по этим выражениям при  $x_0 = 100$  мм приведены в таблице 3.15 и на рисунке 3.33 (кривая 4).

| <i>t</i> , c     | 0     | 0,38   | 0,76   | 1,14  | 1,52  | 1,90   | 2,28   | 2,65  |
|------------------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|
| <i>x(t)</i> , мм | 100,0 | 3,36   | -100,0 | -2,88 | 100,0 | 2,40   | -100,0 | -6,10 |
| <i>у(t)</i> , мм | 0     | -414,0 | 0      | 414,0 | 0     | -414,0 | 0      | 414,0 |

Таблица 3.15

Изделия, испытываемые на герметичность в условиях предприятий, имеют объемы, изменяющиеся в широком диапазоне. Например, для трубопровод-

ной арматуры с условным диаметром от 100 до 400 мм объемы  $V_{u3}$  изменяется от 0,001 до 0,064 м<sup>3</sup>. При использовании горизонтальных трубок диаметром  $d_{mp} = 4 \cdot 10^{-3}$  м или  $d_{mp} = 6 \cdot 10^{-3}$  м, получим, что постоянная времени изменяется от T = 0,235 с до T = 0,546 с и коэффициент демпфирования от  $\xi = 0,035$  до  $\xi = 2,29$ . Влияние этих данных отражено фазовыми траекториями 1-3 на рисунке 3.33.

Таким образом, в динамическом отношении горизонтальная трубка с жидкостным поршнем может быть колебательным или апериодическим звеном второго порядка в зависимости от конструктивных параметров горизонтальной трубки и объема испытываемого на герметичность изделия.

Проведем по передаточной функции (3.174) оценку движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке в одну сторону, например, вправо (рисунок 3.22) от начала движения при возмущении по давлению до момента времени, когда изменяется направление движения. Это изменение направления движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке можно определить по переходной характеристике.

Передаточная функция (3.174) в этом случае принимает вид

$$W_{x/\Delta N}(s) = \frac{x(s)}{\Delta P_2(s)F_{mp} - N_{\sigma}} = \frac{V_{u3}}{E_c F_{mp}^2 \left(T^2 s^2 + 2\xi T s + 1\right)} = \frac{\kappa_1}{\left(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1\right)}, \quad (3.186)$$

где  $\kappa_1 = V_{us} / E_z F_{mp}^2$  - коэффициент преобразования, мм/Па;  $T_1$ ,  $\xi_1$  – постоянная времени, с, и коэффициент демпфирования перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке.

После подачи единичного возмущения 1/s, соответствующего силе  $|\Delta P_2(s)F_{mp} - N_{\sigma}|$ , из (3.186) получим

$$x(s) = \frac{\kappa_1}{\left(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1\right)} \cdot \frac{1}{s} = \kappa_1 \left[\frac{1}{s} - \frac{s + \frac{\xi_1}{T_1}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\frac{\xi_1}{T_1}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T_1}\right)^2}\right].$$

Это выражение после z - преобразования и упрощения при периоде квантования сигнала T = 0,1 с;  $T_1 = 0,235$  с;  $\xi_1 = 0,440$ ;  $\kappa_1 = 100$  мм/H;  $\Delta P_2(s)F_{mp} = 1,15$  H;  $N_{\sigma} = 0,15$  H принимает вид

$$x(z) = \frac{38,2z^2 - 23,3z}{z^3 - 2,539z^2 + 2,227z - 0,688}.$$
 (3.187)

Данные, полученные по этому выражению, приведены в таблице 3.16, а переходная характеристика - на рисунке 3.34 (кривая 1).

| Таб          | блица 3.1 | 6    |      |       |       |       |       |   |
|--------------|-----------|------|------|-------|-------|-------|-------|---|
| <i>t</i> , c | 0         | 0,1  | 0,2  | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 1 |
| x(t), MM     | 0         | 38,2 | 73,6 | 102,0 | 121,2 | 131,3 | 134,0 |   |

Прололжение таблицы 3.16

| r ·             |       |       |       |       |      |      |      |       |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| <i>t</i> ,c     | 0,8   | 0,9   | 1,0   | 1,1   | 1,2  | 1,3  | 1,4  | 1,5   |
| <i>x(t),</i> мм | 123,2 | 115,0 | 107,1 | 101,2 | 96,0 | 94,4 | 98,7 | 106,3 |

Передаточную функцию (3.186) представим в следующем виде

$$W_{x/\Delta N}(s) = \frac{x(s)}{\Delta P_2(s)F_{mp} + \Delta P_{ym}(s)F_{mp} - N_{\sigma}} = \frac{\kappa_1}{\left(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1\right)},$$
(3.188)

где  $\Delta P_2(s)F_{mp}$  - сила, приложенная к жидкостному поршню горизонтальной трубки за счет специально подводимого в устройство испытаний единичного возмущения давления пробной среды, H;

 $\Delta P_{ym}(s)F_{mp}$  - сила, приложенная к жидкостному поршню горизонтальной трубки за счет утечек пробной среды из изделия при контроле герметичности, H;

*N<sub>σ</sub>* – сила, приложенная к жидкостному поршню за счет воздействия на него поверхностного натяжения жидкости в горизонтальной трубке, Н.



Рисунок 3.34 – Переходные характеристики перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, построенные по выражению (3.187)

 $\frac{0,7}{130,1}$ 

Сила  $\Delta P_{ym}(s)F_{mp}$ , приложенная к жидкостному поршню горизонтальной трубки за счет утечек пробной среды из изделия может изменяться в пределах от нуля до  $N_{\sigma}$ .

Определим по (3.188) выражения для перемещения жидкостного поршня в трубке для двух различных значений силы  $\Delta P_{ym}(s)F_{mp}$ , приложенной к жидкостному поршню горизонтальной трубки за счет утечек пробной среды из изделия при контроле герметичности:

$$x_1(s) = \frac{\kappa_1}{\left(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1\right)} \left[ \Delta P_2(s) F_{mp} + \Delta P_{ym1}(s) F_{mp} - N_{\sigma} \right],$$

$$x_{2}(s) = \frac{\kappa_{1}}{\left(T_{1}^{2}s^{2} + 2\xi_{1}T_{1}s + 1\right)} \left[\Delta P_{2}(s)F_{mp} + \Delta P_{ym2}(s)F_{mp} - N_{\sigma}\right].$$

Считая, что  $\Delta P_{ym2}(s) > \Delta P_{ym1}(s)$ , вычитаем из второго выражения первое и определим изменение перемещения жидкостного поршня в трубке  $\Delta x(s)$ 

$$\Delta x(s) = \frac{\kappa_1}{\left(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1\right)} \left[ \Delta P_{ym2}(s) F_{mp} - \Delta P_{ym1}(s) F_{mp} \right].$$

После обратного преобразования по Лапласу этого выражения, принимая, что  $\Delta P_{ym1}(s) = 0$ , как перепад давлений от начального значения утечек из изделия, равных нулю, и, рассматривая явления в статике, получим следующее выражение

$$\Delta x(t) = k_1 \Delta P_{ym2}(t) F_{mp} = k_1 \Delta P_{ym}(t) F_{mp} = \frac{V_{u3}}{E_z F_{mp}^2} \cdot \Delta P_{ym}(t) F_{mp} = \frac{V_{u3}}{E_z F_{mp}} \cdot \Delta P_{ym}(t). \quad (3.189)$$

Как видно из выражения (3.189) увеличение возмущающей силы на любое значение в пределах от нуля до  $\Delta P_{ym}(s)F_{mp}$  приводит к пропорциональному увеличению выходной величины – перемещения жидкостного поршня в трубке  $\Delta x(t)$ . Если, например, в выражении (3.188)  $\kappa_1 = 100$  мм/H;  $\Delta P_2(s)F_{mp} = 1,15$  H;  $N_{\sigma} = 0,15$  H;  $\Delta P_{ym}(s)F_{mp} = 0,0$  H, тогда получим по кривой 1 на рисунке 3.34, что  $x_{1max}(t) = 1,34 \cdot \kappa_1 = 1,34 \cdot 100 = 134$  мм.

Если  $\kappa_1 = 100$  мм/Н;  $\Delta P_2(s)F_{mp} = 1,15$  Н;  $N_{\sigma} = 0,15$  Н;  $\Delta P_{ym}(s)F_{mp} = 0,15$ Н, тогда  $\Delta P_2(s)F_{mp} + \Delta P_{ym}(s)F_{mp} - N_{\sigma} = 1,15$  Н, а  $x_{2max}(t) = 1,34 \cdot .1,15 = 1,54 \cdot \kappa_1$ = 1,54 ·100 = 154 мм (кривая 2 на рисунке 3.34). Разность максимальных отклонений перемещения жидкостного поршня в трубке  $\Delta x_{vm}(t) = 154 - 134 = 20$  мм.

Рассматривая действие перепада давлений на жидкостный поршень горизонтальной трубки от утечек среды из изделия как дополнительного перепада давлений к единичному возмущению по давлению в устройстве испытаний, из передаточной функции следует, что при подводе в устройство испытаний возмущений пробной среды появляется возможность измерения перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке в зоне нечувствительности перемещения жидкостного поршня связанной с действием поверхностного натяжения жидкости.

При этом результаты измерений перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке пропорциональны изменению перепада давления на жидкостном поршне в пределах от нуля до любого выбранного при возмущении давления, включая и пропорциональность перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке в зоне нечувствительности перемещения этого поршня от сил поверхностного натяжения жидкости. Из этого следует, что при подводе возмущений давления в устройство испытаний изделий происходит линеаризация нелинейной части зависимости между перемещением жидкостного поршня и приложенного к поршню перепада давлений.

### 3.4.3 Исследование влияния сил поверхностного натяжения различных жидкостей и сил вязкого трения на перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке

Для исследования влияния сил поверхностного натяжения жидкости и сил вязкого трения на перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке используем уравнения (3.173), рассматривая свободные движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, то есть, принимая в уравнениях (3.173) при x(t) > 0 и x(t) < 0 силу  $\Delta P_2(t) \cdot F_{mp} = 0$ . При этих условиях уравнение (3.173) принимает вид

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \kappa_{z.mp} \frac{dx(t)}{dt} + \frac{E_z F_{mp}^2}{V_{u3}} x(t) = \begin{vmatrix} N_\sigma & \text{при } x(t) > 0; \\ N_\sigma & \text{при } x(t) < 0; \\ x = const & \text{при } x(t) = 0. \end{vmatrix}$$

Принимая, как и выше, обозначения:  $E_2 F_{mp}^2 / m V_{u3} = \omega_0^2$ ,  $\kappa_{z.mp} / m = 2\beta$  и  $N_{\sigma} / m = \omega_0^2 \cdot b \ (\omega_0 - \text{частота, c}^{-1}; \ \omega_0 = 1/T$ , где *T* – постоянная времени, c; *b* – величина, имеющая размерность, м, и характеризующая зону нечувствительности в перемещении жидкостного поршня в горизонтальной трубке от сил поверхностного натяжения жидкости),  $\Delta P_2(t) \cdot F_{mp} = N_{\Delta P}(t)$ , из выше приведенного выражения получим:

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2\beta \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(t) = \begin{bmatrix} \omega_0^2 b & \text{при } x(t) > 0; \\ \omega_0^2 b & \text{при } x(t) < 0; \end{bmatrix}$$
(3.190)

$$x = const$$
 при  $x(t) = 0$ .

Рассмотрим решение уравнений (3.190) для первых четырех полупериодов свободных движений после возмущения силой вперед, назад, вперед, назад.

Второе выражение уравнения (3.190) имеет вид при dx/dt < 0 и |x| > b(второе выражение рассматриваем первым потому, что график переходного процесса начинается с начального значения x<sub>0</sub>, которое имеет максимальное значение при t = 0 и с увеличением времени значения  $x_0$  уменьшаются и соответственно производная dx/dt < 0 после начальной точки)

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + 2\beta \cdot \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(t) = \omega_0^2 \cdot b$$

или

 $\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2\beta \cdot \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 [x(t) - b] = 0.$  Введем новую переменную  $x_1(t) = [x(t) - b]$ , определим первую и вторую производные и сделаем подстановку их в это выражение

$$\frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + 2\beta \cdot \frac{dx_1(t)}{dt} + \omega_0^2 x_1(t) = 0.$$

Решение этого уравнения проводится аналогично решению уравнения (3.177) и имеет вид

$$x_1(t) = e^{\sigma t} (A \cos \omega t + B \sin \omega t)$$

$$x_1(t) = x_0 e^{-\beta t} \left( \cos \omega t + \frac{\beta}{\omega} \sin \omega t \right),$$

ИЛИ

в котором  $x_1(t) = [x(t) - b]$  и поэтому

$$x(t) = b + x_0 e^{-\beta t} \left( \cos \omega t + \frac{\beta}{\omega} \sin \omega t \right), \quad \text{при } 0 \le \omega t \le \pi.$$
 (3.191)

Это уравнение определяет движение жидкостного поршня в координатах перемещение – время x(t) = f(t) в течение первого полупериода при  $0 \le \omega t \le \pi$ .

Первое выражение уравнения (3.190) имеет вид при dx/dt > 0; |x| > b

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + 2\beta \cdot \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(t) = -\omega_0^2 \cdot b$$

или  $\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2\beta \cdot \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 [x(t) + b] = 0$ . Введем новую переменную  $x_1(t) = [x(t) + b]$ , определим первую и вторую производные и сделаем подстановку их в это выражение

$$\frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + 2\beta \cdot \frac{dx_1(t)}{dt} + \omega_0^2 x_1(t) = 0.$$

Решение этого уравнения проводится аналогично решению уравнения (3.177) и имеет вид

$$x_1(t) = e^{\sigma t} (A \cos \omega t + B \sin \omega t)$$

 $x_1(t) = x_0 e^{-\beta t} \left( \cos \omega t + \frac{\beta}{\omega} \sin \omega t \right),$ 

ИЛИ

в котором  $x_1(t) = [x(t)+b]$  и начальное условие вместо  $x_0$  будет равным  $(x_0 e^{-\beta t} - 2b)$ , поэтому

$$x(t) = -b + \left(x_0 e^{-\beta t} - 2b\right) \cdot \left(\cos \omega t + \frac{\beta}{\omega}\sin \omega t\right), \quad (3.192)$$
  
при  $\pi \le \omega t \le 2\pi$  и  $\left(x_0 e^{-\beta t} > 2b\right).$ 

Это уравнение определяет движение жидкостного поршня в координатах перемещение – время x(t) = f(t) в течение второго полупериода при  $\pi \le \omega t \le 2\pi$ .

Аналогично получим уравнение движения жидкостного поршня в координатах перемещение – время x(t) = f(t) в течение третьего полупериода при  $2\pi \le \omega t \le 3\pi$ 

$$x(t) = b + \left(xe^{-\beta t} - 4b\right) \cdot \left(\cos \omega t + \frac{\beta}{\omega}\sin \omega t\right), \quad (3.193)$$
  
при  $2\pi \le \omega t \le 3\pi$  и  $\left(x_0 e^{-\beta t} > 4b\right).$ 

Уравнение движения жидкостного поршня в координатах перемещениевремя x(t) = f(t) в течение четвертого полупериода при  $3\pi \le \omega t \le 4\pi$ 

$$x(t) = -b + \left(x_0 e^{-\beta t} - 6b\right) \cdot \left(\cos \omega t + \frac{\beta}{\omega}\sin \omega t\right), \qquad (3.194)$$
  
при  $3\pi \le \omega t \le 4\pi$  и  $\left(x_0 e^{-\beta t} > 6b\right).$ 

В таблице 3.17 приведены результаты вычислений по формулам (3.191) - (3.194) перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке устройств для испытаний изделий на герметичность для начальных значений  $x_0 = 36$ , 42 и 50 мм и различных значениях  $\beta$ .

| Гаолица 5.17                        |         |       |       |       |       |  |
|-------------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|--|
| Вычисления проводятся по формуле    | (3.191) |       |       |       |       |  |
| Угол, выраженный через π            | 0       | π/4   | π/2   | 3 π/4 | π     |  |
| Угол, выраженный в радианах,        | 0       | 0,785 | 1,570 | 2,355 | 3,140 |  |
| равный $\omega t$ , $\omega = 4,14$ |         |       |       |       |       |  |
| Время, t, c                         | 0       | 0,189 | 0,379 | 0,568 | 0,758 |  |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 36$ мм;  | 42,0    | 31,5  | 6,1   | -19,3 | -30,0 |  |
| $\beta = 0; b = 6$ MM               |         |       |       |       |       |  |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 42$ мм;  | 48,0    | 35,8  | 6,0   | -23,6 | -36,0 |  |
| $\beta = 0; b = 6 \text{ MM}$       |         |       |       |       |       |  |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 50$ мм;  | 56,0    | 41,4  | 6,0   | -29,2 | -44,0 |  |
| $\beta = 0; b = 6 \text{ MM}$       |         |       |       |       |       |  |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 50$ мм;  | 56,0    | 41,7  | 7,8   | -25,1 | -38,6 |  |
| $\beta = 0,15; b = 6$ MM            |         |       |       |       |       |  |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 50$ мм;  | 56,0    | 41,9  | 9,3   | -21,5 | -33,8 |  |
| $\beta = 0,30; b = 6$ MM            |         |       |       |       |       |  |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 50$ мм;  | 56,0    | 42,1  | 17,2  | -0,6  | -6,1  |  |
| $\beta = 1,872; b = 6$ MM           |         |       |       |       |       |  |

Таблица 3 17

Продолжение таблицы 3.17

| Вычисления проводятся по формуле                                 |       |       | (3.192)  |          |       |
|--|-------|-------|----------|----------|-------|
| Угол, выраженный через π   | π     | 5π/4  | $3\pi/2$ | $7\pi/4$ | 2π    |
| Угол, выраженный в радианах, равный $\omega t$ , $\omega = 4,14$ | 3,140 | 3,925 | 4,710    | 5,495    | 6,280 |
| Время, t, c  | 0,758 | 0,947 | 1,137    | 1,326    | 1,516 |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 36$ мм;<br>$\beta = 0; b = 6$ мм      | -30,0 | -23,0 | -6,0     | 10,9     | 18,0  |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 42$ мм;<br>$\beta = 0; b = 6$ мм      | -36,0 | -27,3 | -6,1     | 15,1     | 24,0  |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 50$ мм;<br>$\beta = 0; b = 6$ мм      | -44,0 | -33,0 | -6,1     | 20,8     | 32,0  |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 50$ мм;<br>$\beta = 0,15; b = 6$ мм   | -38,6 | -29,1 | -7,2     | 13,6     | 21,8  |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 50$ мм;<br>$\beta = 0,30; b = 6$ мм   | -33,8 | -25,5 | -7,8     | 8,0      | 13,7  |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 50$ мм;<br>$\beta = 1,872; b = 6$ мм  | -     | -     | -        | -        | -     |
| Угол, выраженный в радианах, равный <i>ωt</i> , <i>ω</i> = 4,14  | 6,280 | 7,065 | 7,850    | 8,635    | 9,420 |
| Время, t, c  | 1,516 | 1,705 | 1,894    | 2,084    | 2,273 |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 36$ мм;<br>$\beta = 0; b = 6$ мм      | 18,0  | 14,5  | 6,1      | -2,4     | -6,0  |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 42$ мм;<br>$\beta = 0; b = 6$ мм      | 24,0  | 18,8  | 6,1      | -6,7     | -12,0 |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 50$ мм;<br>$\beta = 0; b = 6$ мм      | 32,0  | 24,5  | 6,2      | -12,2    | -20,0 |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 50$ мм;<br>$\beta = 0,15; b = 6$ мм   | 21,8  | 16,9  | 6,7      | -2,5     | -5,5  |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 50$ мм;<br>$\beta = 0,30; b = 6$ мм   | 13,7  | 10,6  | 6,4      | 4,2      | 4,7   |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 50$ мм;<br>$\beta = 1,872; b = 6$ мм  | -     | -     | -        | -        | -     |

Продолжение таблицы 3.17

| Вычисления проводятся по формуле         | (3.194) |        |          |        |        |  |  |
|--|---------|--------|----------|--------|--------|--|--|
| Угол, выраженный                         | 3π      | 13π/4  | $7\pi/2$ | 15π /4 | 4π     |  |  |
| через π                                  |         |        |          |        |        |  |  |
| Угол, выраженный в радиа-                | 9,420   | 10,250 | 10,990   | 11,775 | 12,560 |  |  |
| нах, равный $\omega t$ , $\omega = 4,14$ |         |        |          |        |        |  |  |
| Время, t, c                              | 2,273   | 2,464  | 2,653    | 2,842  | 3,032  |  |  |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 42$ мм;       | -12,0   | -10,3  | -6,0     | -      | -      |  |  |
| $\beta = 0; b = 6 \text{ MM}$            |         |        |          |        |        |  |  |
| Значение $x(t)$ при $x_0 = 50$ мм;       | -20,0   | -15,9  | -6,1     | 3,8    | 8,0    |  |  |
| $\beta = 0; b = 6 \text{ MM}$            |         |        |          |        |        |  |  |

На рисунке 3.35 приведены графики перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке при учете сил поверхностного натяжения жидкости по первому и второму выражениям уравнения (3.190) в соответствии с данными таблицы 3.17:  $1 - x_0 = 50$  мм и  $\beta = 0$ ;  $2 - x_0 = 42$  мм и  $\beta = 0$ ;  $3 - x_0 = 50$  мм и  $\beta = 1,872$ .



 $1 - x_0 = 50$  мм и  $\beta = 0; 2 - x_0 = 42$  мм и  $\beta = 0; 3 - x_0 = 50$  мм и  $\beta = 0,15; 4 - x_0 = 50$  мм и  $\beta = 1,872$ 

Рисунок 3.35 - Перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке при учете сил поверхностного натяжения жидкости по первому и второму выражениям уравнения (3.190) при b = 6,0 мм

Выражения (3.192) – (3.195) после упорядочения соответствующих индексов при переменной *x(t)* для четырех полупериодов движения принимают вид

$$\begin{aligned} x_{1}(t) &= b + x_{0}e^{-\beta t} \cdot \left[\cos \omega t + (\beta / \omega)\sin \omega t\right] & \text{при } 0 \leq \omega t \leq \pi; \\ x_{2}(t) &= -b + \left(x_{0}e^{-\beta t} - 2b\right) \cdot \left[\cos \omega t + (\beta / \omega)\sin \omega t\right] \\ \text{при } \pi \leq \omega t \leq 2\pi \text{ и } \left(x_{0}e^{-\beta t} > 2b\right); \\ x_{3}(t) &= b + \left(x_{0}e^{-\beta t} - 4b\right) \cdot \left[\cos \omega t + (\beta / \omega)\sin \omega t\right] \\ \text{при } 2\pi \leq \omega t \leq 3\pi \text{ и } \left(x_{0}e^{-\beta t} > 4b\right); \end{aligned}$$
(3.195)

$$\begin{aligned} x_4(t) &= -b + \left( x_0 e^{-\beta t} - 6b \right) \cdot \left[ \cos \omega t + \left( \beta / \omega \right) \sin \omega t \right] \\ \text{при } 3\pi &\leq \omega t \leq 4\pi \text{ и } \left( x_0 e^{-\beta t} > 6b \right), \end{aligned}$$

где 
$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - 0.5\beta}$$
;  $\omega_0 = \sqrt{E_z F_{mp}^2 / m V_{u3}}$ ;  $\beta = \kappa_{z.mp} / 2m$ ;  $b = N_\sigma / m \omega_0^2$ ;  $x_0$ 

– начальное перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке, мм.

Производные от  $x_1(t) - x_4(t)$  по времени для выражений (3.195), принимая обозначения  $y_1(t) = dx_1(t)/dt - y_4(t) = dx_4(t)/dt$ , принимают следующий вид:

$$y_{1}(t) = -x_{0}e^{-\beta t} \cdot \left(\omega + \beta^{2} / \omega\right) \sin \omega t, \quad \text{при } 0 \leq \omega t \leq \pi;$$

$$y_{2}(t) = -x_{0}e^{-\beta t} \cdot \left(\omega + \beta^{2} / \omega\right) \sin \omega t + 2b \left(\omega \sin \omega t - \beta \cos \omega t\right)$$
при  $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$  и  $\left(x_{0}e^{-\beta t} > 2b\right);$ 

$$y_{3}(t) = -x_{0}e^{-\beta t} \cdot \left(\omega + \beta^{2} / \omega\right) \sin \omega t + 4b \left(\omega \sin \omega t - \beta \cos \omega t\right) \quad (3.196)$$
при  $2\pi \leq \omega t \leq 3\pi$  и  $\left(x_{0}e^{-\beta t} > 4b\right);$ 

$$y_{4}(t) = -x_{0}e^{-\beta t} \cdot \left(\omega + \beta^{2} / \omega\right) \sin \omega t + 6b \left(\omega \sin \omega t - \beta \cos \omega t\right)$$
при  $3\pi \leq \omega t \leq 4\pi$  и  $\left(x_{0}e^{-\beta t} > 6b\right).$ 

Если в выражениях (3.195) и (3.196) принять  $\beta = 0$  и b = 0, тогда получим:

$$x(t) = x_1(t) = x_2(t) = x_3(t) = x_4(t) = x_0 \cos \omega t,$$
  

$$y(t) = y_1(t) = y_2(t) = y_3(t) = y_4(t) = -x_0 \cos \omega t.$$
 (3.197)

Эти же выражения можно получить из (3.178) и (3.180) при  $\beta = 0 \text{ c}^{-1}$ , по которым при  $x_0 = 100 \text{ мм}$ ,  $\omega = 4.14 \text{ c}^{-1}$  построена кривая 4 на рисунке 3.33.

Используя выше полученные выражения, проведем исследование влияния на движение жидкостного поршня в горизонтальной трубке:

- сил поверхностного натяжения жидкости жидкостного поршня в горизонтальной трубке;

- типа жидкости поршня в трубке с различным значением поверхностного натяжения жидкости;

- совместного действия сил поверхностного натяжения жидкости и сил жидкостного трения поршня в трубке;

- перепада давлений на жидкостном поршне от утечек газа из изделия, который меньше по значению, чем перепад давлений, создаваемый силой поверхностного натяжения жидкости.

Если в (3.195) и (3.196) принять  $\beta = 0$  и  $b \neq 0$ , тогда получим:

$$x_{1}(t) = b + x_{0} \cos \omega t \quad \mathbf{H}$$
  

$$y_{1}(t) = -x_{0}\omega \sin \omega t , \quad \text{при } 0 \leq \omega t \leq \pi;$$
  

$$x_{2}(t) = -b + (x_{0} - 2b) \cdot \cos \omega t \quad \mathbf{H}$$
  

$$y_{2}(t) = -(x_{0} - 2b) \cdot \omega \sin \omega t \quad \text{при} \quad \pi \leq \omega t \leq 2\pi \text{ H} (x_{0} > 2b);$$
  

$$x_{3}(t) = b + (x_{0} - 4b) \cdot \cos \omega t \quad \mathbf{H}$$
  

$$y_{3}(t) = -(x_{0} - 4b) \cdot \omega \sin \omega t \quad \text{при} \ 2\pi \leq \omega t \leq 3\pi \text{ H} (x_{0} > 4b); \quad (3.198)$$
  

$$x_{4}(t) = -b + (x_{0} - 6b) \cdot \cos \omega t \quad \mathbf{H}$$
  

$$y_{4}(t) = -(x_{0} - 6b) \cdot \omega \sin \omega t \quad \text{при} \ 3\pi \leq \omega t \leq 4\pi \text{ H} (x_{0} > 6b).$$

По выражениям (3.198) определены значения  $x_1(t) - x_4(t)$  и  $y_1(t) - y_4(t)$  (таблицы 3.18 и 3.19) и построены на рисунке 3.36 кривая 2 при  $\beta = 0 \text{ c}^{-1}$ ,  $x_0 = 100 \text{ мм}$ ,  $\omega = 4,14 \text{ c}^{-1}$ , b = 6 мм (для жидкостного поршня из воды) и кривая 3 при  $\beta = 0 \text{ c}^{-1}$ , при  $x_0 = 100 \text{ мм}$ ,  $\omega = 4,14 \text{ c}^{-1}$ , b = 40,3 мм (для жидкостного поршня из ртути).

Кривая 1 для жидкостного поршня из ртути или воды на рисунке 3.36 может быть построена по выражениям (3.198) при  $\beta = 0$  с<sup>-1</sup>,  $x_0 = 100$  мм,  $\omega = 4.14$  с<sup>-1</sup> и b = 0 мм или по выражениям (3.178), (3.180) при  $\beta = 0$  с<sup>-1</sup>,  $x_0 = 100$  мм,  $\omega = 4.14$  с<sup>-1</sup>.

Таблица 3.18 - Значения  $x_1(t) - x_4(t)$  и  $y_1(t) - y_4(t)$ , вычисленные по формулам (3.198) при  $\beta = 0$  с<sup>-1</sup>,  $x_0 = 100$  мм, b = 6 мм,  $\omega = 4,14$  с<sup>-1</sup> (кривая 2 на рисунке 3.36)

| ωt       | 0   | π/2  | π   | (3/2)π | 2π  | (5/2)π | 3π  | (7/2)π | 4π  |
|----------|-----|------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| $x_1(t)$ | 106 | +6   | -94 |        |     |        |     |        |     |
| $y_1(t)$ | 0   | -414 | 0   |        |     |        |     |        |     |
| $x_2(t)$ |     |      | -94 | -6     | +62 |        |     |        |     |
| $y_2(t)$ |     |      | 0   | +324   | 0   |        |     |        |     |
| $x_3(t)$ |     |      |     |        | -62 | +6     | -42 |        |     |
| $y_3(t)$ |     |      |     |        | 0   | -270   | 0   |        |     |
| $x_4(t)$ |     |      |     |        |     |        | -42 | -6     | +12 |
| $y_4(t)$ |     |      |     |        |     |        | 0   | +102   | 0   |

Таблица 3.19 - Значения  $x_1(t) - x_3(t)$  и  $y_1(t) - y_3(t)$ , вычисленные по формулам (3.198) при  $\beta = 0$  с<sup>-1</sup>,  $x_0 = 100$  мм, b = 40,3 мм (для жидкостного поршня из ртути),  $\omega = 4,14$  с<sup>-1</sup> (кривая 3 на рисунке 3.36)

| ωt       | 0   | π/2  | π   | (3/2)π | 2π  | (5/2)π |
|----------|-----|------|-----|--------|-----|--------|
| $x_1(t)$ | 140 | +42  | -58 |        |     |        |
| $y_1(t)$ | 0   | -414 | 0   |        |     |        |
| $x_2(t)$ |     |      | -58 | -42    | -26 |        |
| $y_2(t)$ |     |      | 0   | +66    | 0   |        |
| $x_3(t)$ |     |      |     |        | -26 | +42    |
| $y_3(t)$ |     |      |     |        | 0   | -      |

Если в (3.195) и (3.196) принять b=0, тогда получим следующие выражения, аналогичные (3.178) и (3.180):

$$x(t) = x_{1}(t) = x_{2}(t) = x_{3}(t) = x_{4}(t) = x_{0}e^{-\beta t} \cdot \left[\cos \omega t + (\beta / \omega)\sin \omega t\right];$$
  
$$y(t) = y_{1}(t) = y_{2}(t) = y_{3}(t) = y_{4}(t) = -x_{0}e^{-\beta t} \cdot (\omega + \beta^{2} / \omega)\sin \omega t.(3.199)$$

Если в выражениях (3.195) и (3.196)  $b \neq 0$  и  $\beta \neq 0$ , тогда получим данные, приведенные в таблицах 3.20 и 3.21 и на рисунке 3.37, характеризующие влияние сил вязкого трения при учете сил поверхностного натяжения жидкости поршня на фазовые траектории его движения в горизонтальной трубке.



кривая 1 построена при  $\beta = 0$  с<sup>-1</sup>,  $x_0 = 100$  мм,  $\omega = 4.14$  с<sup>-1</sup>, b = 0 мм (для жидкостного поршня из ртути или воды); кривая 2 - при  $\beta = 0$  с<sup>-1</sup>,  $x_0 = 100$  мм,  $\omega = 4,14$  с<sup>-1</sup>, b = 6 мм (для жидкостного поршня из воды); кривая 3 - при  $\beta = 0$  с<sup>-1</sup>, при  $x_0 = 100$  мм,  $\omega = 4,14$  с<sup>-1</sup>, b = 40,3 мм (для жидкостного поршня из ртути)

Рисунок 3.36 - Влияние сил поверхностного натяжения различных жидкостей жидкостного поршня на фазовые траектории движения поршня в горизонтальной трубке, построенные по выражениям (3.198)

Таблица 3.20 - Значения  $x_1(t) - x_4(t)$  и  $y_1(t) - y_4(t)$ , вычисленные по формулам (3.195) и (3.196) при  $\beta = 0,15$  с<sup>-1</sup>,  $x_0 = 100$  мм, b = 6 мм,  $\omega = 4,14$  с<sup>-1</sup> (кривая 2 на рисунке 3.37)

| ωt       | 0   | π/2  | π     | 3π/2 | 2π    | 5π/2 | 3π    | 7π/2 | 4π   |
|----------|-----|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|
| $x_1(t)$ | 106 | +9,2 | -83,2 |      |       |      |       |      |      |
| $y_1(t)$ | 0   | -391 | +1,8  |      |       |      |       |      |      |
| $x_2(t)$ |     |      | -83,2 | -8,1 | +61,6 |      |       |      |      |
| $y_2(t)$ |     |      | +3,3  | +299 | -4,5  |      |       |      |      |
| $x_3(t)$ |     |      |       |      | +61,6 | +7,2 | -41,1 |      |      |
| $y_3(t)$ |     |      |       |      | -5,8  | -212 | +6,4  |      |      |
| $x_4(t)$ |     |      |       |      |       |      | -41,1 | -6,6 | +21  |
| $y_4(t)$ |     |      |       |      |       |      | +7,5  | +129 | -7,6 |



Рисунок 3.37 – Влияние сил вязкого трения при учете сил поверхностного натяжения жидкости поршня на фазовые траектории его движения в горизонтальной трубке устройства контроля герметичности изделий

Таблица 3.21 - Значения  $x_1(t) - x_2(t)$  и  $y_1(t) - y_2(t)$ , вычисленные по формулам (3.195) и (3.196) при  $\beta = 1,872$  с<sup>-1</sup>,  $x_0 = 100$  мм, b = 6 мм (для воды),  $\omega = 4,14$  с<sup>-1</sup> (кривая 3 на рисунке 3.37)

| ωt       | 0    | $\pi/2$ | π   | (3/2)π | 2π  |
|----------|------|---------|-----|--------|-----|
| $x_1(t)$ | +106 | +26     | -18 |        |     |
| $y_1(t)$ | 0    | -245    | 0   |        |     |
| $x_2(t)$ |      |         | -18 | -6     | -12 |
| $y_2(t)$ |      |         | -22 | +9     | -22 |

### 3.4.4 Исследование влияния перепада давлений на жидкостном поршне от утечек газа из изделия, который меньше по значению, чем перепад давлений, создаваемый силой поверхностного натяжения жидкости

Дифференциальное уравнение (3.173) движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке выведено для обычных условий работы устройства контроля герметичности изделий, не учитывая периодические или другого вида возмущения давления пробной среды в изделии и соответственно возмущения в перемещении жидкостного поршня в горизонтальной трубке.

Предлагаемое в настоящей работе положение о целесообразности периодических возмущений пробной среды в изделии при контроле герметично-

сти направлено, в основном, на тот случай, когда разность давлений на жидкостном поршне от утечек пробной среды из изделия меньше по значению, чем разность давлений, создаваемая поверхностным натяжением жидкости жидкостного поршня в трубке.

Значения перепада давлений на жидкостном поршне большие, чем перепад давлений, создаваемый поверхностным натяжением жидкости в горизонтальной трубке, приводят к пропорциональному перемещению жидкостного поршня в горизонтальной трубке и не вызывают затруднений при контроле герметичности изделий.

При контроле герметичности изделий устройством с использованием горизонтальной трубки с жидкостным поршнем и при сообщении жидкостному поршню возмущений по перемещению за счет возмущения давления пробной среды в изделии дифференциальное уравнение (3.173) с учетом (3.188) может быть представлено в следующем виде

$$m \frac{d^{2}x(t)}{dt^{2}} + \kappa_{z.mp} \frac{dx(t)}{dt} + \frac{E_{z}F_{mp}^{2}}{V_{u3}}x(t) + N_{\sigma}Sign \ x(t) = \Delta P_{2}(t)F_{mp} + \Delta P_{ym}(t)F_{mp}$$
  
при  $x(t) \neq 0$  или при  $x(t) = 0$  и  $|\Delta P_{2}(t) + \Delta P_{ym}(t)|F_{mp} > N_{\sigma};$  (3.200)  
 $x = const$  при  $x(t) = 0$  и  $|\Delta P_{2}(t) + \Delta P_{ym}(t)|F_{mp} < N_{\sigma},$ 

где  $\Delta P_2(t)F_{mp}$  - сила, приложенная к жидкостному поршню горизонтальной трубки за счет специально подводимого в устройство испытаний возмущения давления пробной среды, H;

 $\Delta P_{ym}(t)F_{mp} = N_{ym}(t)$  - сила, приложенная к жидкостному поршню горизонтальной трубки за счет утечек пробной среды из изделия при контроле герметичности, Н.

Сила  $N_{ym}(t)$  от перепада давлений на жидкостном поршне от утечек газа из изделия, который меньше по значению, чем перепад давлений, создаваемый силой поверхностного натяжения жидкости, может изменяться в пределах  $0 \le N_{ym}(t) \le N_{\sigma}$ . Сила  $N_{ym}(t)$  соответствует какому-то перемещение жидкостного поршня. Обозначим это перемещение через  $b_0$ , мм, а силу  $N_{ym}(t) = \omega_0^2 b_0$ . Величина  $b_0$  может изменяться в пределах  $0 \le b_0 \le b$ . Уравнение (3.200) принимает в этом случае, аналогично выражению (3.190), следующий вид, если принять при x(t) > 0 и x(t) < 0 силу  $\Delta P_2(t) \cdot F_{mp} = 0$ 

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2\beta \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(t) = \omega_0^2 b_0 + - \begin{vmatrix} \omega_0^2 b & \text{при } x(t) > 0; \\ \omega_0^2 b & \text{при } x(t) < 0; \end{vmatrix}$$
(3.201)

$$x = const$$
 при  $x(t) = 0$ .

После введения новых переменных соответственно для первого и второго выражений  $x_{h1}(t) = x(t) + b - b_0$  и  $x_{h2}(t) = x(t) - b - b_0$ , решения уравнения (3.201) для первых четырех полупериодов свободных движений после возмущения силой и определения производных от  $x_1(t) - x_4(t)$  по времени, принимая обозначения

$$y_1(t) = dx_1(t)/dt - y_4(t) = dx_4(t)/dt$$

принимают вид:

$$\begin{aligned} x_{1}(t) &= b + b_{0} + x_{0}e^{-\beta t} \cdot \left[\cos \omega t + (\beta / \omega)\sin \omega t\right]; \\ y_{1}(t) &= -x_{0}e^{-\beta t} \cdot (\omega + \beta^{2} / \omega)\sin \omega t, \quad \text{при } 0 \leq \omega t \leq \pi; \\ x_{2}(t) &= -b + b_{0} + (x_{0}e^{-\beta t} - 2b) \cdot \left[\cos \omega t + (\beta / \omega)\sin \omega t\right]; \\ y_{2}(t) &= -x_{0}e^{-\beta t} \cdot (\omega + \beta^{2} / \omega)\sin \omega t + 2b(\omega \sin \omega t - \beta \cos \omega t) \\ \text{при } \pi \leq \omega t \leq 2\pi \text{ H} \left(x_{0}e^{-\beta t} > 2b\right); \\ x_{3}(t) &= b + b_{0} + (x_{0}e^{-\beta t} - 4b) \cdot \left[\cos \omega t + (\beta / \omega)\sin \omega t\right]; \quad (3.202) \\ y_{3}(t) &= -x_{0}e^{-\beta t} \cdot (\omega + \beta^{2} / \omega)\sin \omega t + 4b(\omega \sin \omega t - \beta \cos \omega t) \\ \text{при } 2\pi \leq \omega t \leq 3\pi \text{ H} \left(x_{0}e^{-\beta t} - 6b\right) \cdot \left[\cos \omega t + (\beta / \omega)\sin \omega t\right]; \\ x_{4}(t) &= -b + b_{0} + (x_{0}e^{-\beta t} - 6b) \cdot \left[\cos \omega t + (\beta / \omega)\sin \omega t\right]; \\ y_{4}(t) &= -x_{0}e^{-\beta t} \cdot (\omega + \beta^{2} / \omega)\sin \omega t + 6b(\omega \sin \omega t - \beta \cos \omega t) \\ \text{при } 3\pi \leq \omega t \leq 4\pi \text{ H} \left(x_{0}e^{-\beta t} > 6b\right), \end{aligned}$$

где 
$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - 0.5\beta}$$
;  $\omega_0 = \sqrt{E_z F_{mp}^2/mV_{u3}}$ ;  $\beta = \kappa_{z.mp}/2m$ ;  $b = N_\sigma/m\omega_0^2$ ;  $x_0 - \delta_0$ 

начальное перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке, мм.

На рисунке 3.38 приведены построенные по выражениям (3.202) фазовые траектории движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке устройства контроля герметичности изделий в зависимости от перепада давлений на жидкостном поршне от утечек газа из изделия, который меньше по значению, чем перепад давлений, создаваемый силой поверхностного натяжения жидкости.



кривая 1 построена при  $\beta = 0,15 \text{ c}^{-1}$ ,  $x_0 = 100 \text{ мм}$ , b = 6 мм,  $\omega = 4,14 \text{ c}^{-1}$  и  $b_0 = 0 \text{ мм}$  и использовании жидкостного поршня в горизонтальной трубке из воды; кривая 2 - при  $x_0 = 100 \text{ мм}$ ,  $\beta = 0,15 \text{ c}^{-1}$ ; b = 6 мм,  $\omega = 4,14 \text{ c}^{-1}$  и  $b_0 = 1,00 b$  (жидкостный поршень из воды); кривая 3 - для ртутного жидкостного поршня при  $x_0 = 100 \text{ мм}$ ,  $\beta = 0,15 \text{ c}^{-1}$ ; b = 40,3 мм,  $\omega = 4,14 \text{ c}^{-1}$  и  $b_0 = 0 \text{ мм}$ ; кривая 4 - для ртутного жидкостного поршня при  $x_0 = 100 \text{ мм}$ ,  $\beta = 0,15 \text{ c}^{-1}$ ; b = 40,3 мм,  $\omega = 4,14 \text{ c}^{-1}$  и  $b_0 = 0 \text{ мм}$ ; кривая 4 - для ртутного жидкостного поршня при  $x_0 = 100 \text{ мм}$ ,  $\beta = 0,15 \text{ c}^{-1}$ ; b = 40 мм,  $\omega = 4,14 \text{ c}^{-1}$  и  $b_0 = 30 \text{ мм}$ 

Рисунок 3.38 – Влияние перепада давлений на жидкостном поршне от утечек газа из изделия, который меньше по значению, чем перепад давлений, создаваемый силой поверхностного натяжения жидкости, на фазовые траектории движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке устройства контроля герметичности изделий

Кривая 1 на рисунке 3.38 построена при  $\beta = 0,15 \text{ c}^{-1}$ ,  $x_0 = 100 \text{ мм}$ , b = 6 мм,  $\omega = 4,14 \text{ c}^{-1}$  и  $b_0 = 0 \text{ мм}$  при использовании воды в качестве жидкостного поршня в горизонтальной трубке; кривая 2 - при  $x_0 = 100 \text{ мм}$ ,  $\beta = 0,15 \text{ c}^{-1}$ ; b = 6 мм,  $\omega = 4,14 \text{ c}^{-1}$  и  $b_0 = 1,00 b$  (водяной жидкостный поршень в горизонтальной трубке).

Кривые 3 и 4 построены при использовании ртутного жидкостного поршня в горизонтальной трубке: кривая 3 - при  $x_0 = 100$  мм,  $\beta = 0.15$  с<sup>-1</sup>; b = 40.3 мм,  $\omega = 4.14$  с<sup>-1</sup> и  $b_0 = 0$  мм; кривая 4 - при  $x_0 = 100$  мм,  $\beta = 0.15$  с<sup>-1</sup>; b = 40 мм,  $\omega = 4.14$  с<sup>-1</sup> и  $b_0 = 30$  мм.

В таблицах 3.22 и 3.23 приведены численные значения, полученные по выражениям (3.202) при использовании жидкостного поршня в горизонтальной трубке из ртути.

Поверхностное натяжение ртути  $\sigma = 487 \cdot 10^{-3}$  Н/м, а поверхностное натяжение воды  $\sigma = 72,5 \cdot 10^{-3}$  Н/м, то есть, поверхностное натяжение ртути в 6,72 раза больше поверхностного натяжения воды.

В выше рассмотренных примерах для жидкостного поршня из воды использовано определенное по выражению  $b = N_{\sigma}/m\omega_0^2$  значение b = 6 мм. В этом случае для ртути b = 40,3 мм.

Таблица 3.22 - Результаты вычислений (кривая 3 на рисунке 3.38) по выражениям (3.202) для ртутного жидкостного поршня в горизонтальной трубке при  $x_0 = 100$  мм,  $\beta = 0.15$  с<sup>-1</sup>; b = 40.3 мм,  $\omega = 4.14$  с<sup>-1</sup> и  $b_0 = 0$  мм

| ωt       | 0      | π/2    | π     | $(3/2)\pi$ | 2π  |
|----------|--------|--------|-------|------------|-----|
| $x_1(t)$ | +140,3 | +43,2  | -49,2 |            |     |
| $y_1(t)$ | 0      | -391,6 | +1,8  |            |     |
| $x_2(t)$ |        |        | -49,2 | +2,1       | 6,4 |
| $y_2(t)$ |        |        | +2,8  | +48,1      | 1,2 |

Таблица 3.23 - Результаты вычислений (кривая 4 на рисунке 3.38) по выражениям (3.202) для ртутного жидкостного поршня в горизонтальной трубке при  $x_0 = 100$  мм,  $\beta = 0.15$  с<sup>-1</sup>; b = 40.3 мм,  $\omega = 4.14$  с<sup>-1</sup> и  $b_0 = 30$  мм

| ωt       | 0      | $\pi/2$ | π     | $(3/2)\pi$ | 2π   |
|----------|--------|---------|-------|------------|------|
| $x_1(t)$ | +170,3 | +44,1   | -19,0 |            |      |
| $y_1(t)$ | 0      | -399,0  | +2,3  |            |      |
| $x_2(t)$ |        |         | -19,2 | +10,9      | 36,5 |
| $y_2(t)$ |        |         | +2,8  | +122,9     | 12,9 |

Из выражений (3.202) и данных рисунка 3.38 следует, что изменение перепада давлений на жидкостном поршне горизонтальной трубки от утечек пробного газа из изделия в пределах перепада давления, создаваемого поверхностным натяжением жидкости, не изменяет формы фазовой траектории после окончания контроля герметичности изделия, но сдвигает фазовые траектории вправо на фазовой плоскости (кривые 2 и 4 сдвигаются вправо соответственно для жидкостного поршня из воды и ртути относительно кривых 1 и 3).

Для подтверждения этого вывода выполним вычитание из уравнений (3.202) соответствующих выражений (3.195) и получим:

$$\Delta x_{1}(t) = \Delta x_{2}(t) = \Delta x_{3}(t) = \Delta x_{4}(t) = \Delta x_{ym}(t) = b_{0} = \Delta N_{ym}(t) / m \omega_{0}^{2} =$$

$$= \Delta P_{ym}(t) F_{mp} / m \omega_{0}^{2} = N_{ym}(t) V_{u3} / E_{c} F^{2}_{mp} = \Delta P_{ym}(t) V_{u3} / E_{c} F_{mp} \qquad (3.203)$$

$$\Delta x_{ym}(t) / \Delta N_{ym}(t) = V_{u3} / E_{c} F^{2}_{mp} = \kappa_{a} = tg\varphi,$$

ИЛИ

где  $\Delta x_1(t)$ ;  $\Delta x_2(t)$ ;  $\Delta x_3(t)$ ;  $\Delta x_4(t)$  – разности перемещений жидкостного поршня в горизонтальной трубке, полученные по выражениям 1-4 уравнений (3.202) и (3.195), м;

 $\Delta x_{ym}(t)$  - перемещение жидкостного поршня в трубке от утечек газа из изделия, которые создают перепад давления на жидкостном поршне меньший по значению, чем перепад давлений, создаваемый поверхностным натяжением жидкости поршня в трубке, м;

 $\Delta N_{ym}(t)$ ;  $\Delta P_{ym}(t)$  – соответственно сила, Н, и разность давлений, Па, создаваемые на жидкостном поршне горизонтальной трубки утечками газа из изделия.

Выражение (3.203), полученное с использованием метода фазовых траекторий, аналогично уравнению (3.189), полученному с использованием передаточной функции перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке от приложенного перепада давлений.

На рисунке 3.39 приведена характеристика перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке в зависимости от приложенного к жидкостному поршню перепада давления от утечек сжатого воздуха из изделия, испытываемого на герметичность, в пределах зоны нечувствительности перемещения жидкостного поршня от перепада давления, при подаче периодических возмущений по давлению (перемещению жидкостного поршня) в устройство испытаний.

Прямая 1 на рисунке 3.39 построена по выражению (3.203). Если объем изделия  $V_1 = 0,012 \text{ м}^3$  (0,1 м · 0,4 м · 0,3 м), диаметр горизонтальной трубки  $d_{mp}=4 \text{ мм}$  и  $E_2 = 0,127 \cdot 10^6 \text{ Па}$ , тогда, например, при  $\Delta P_{2ym}(t) = 60,0 \text{ Па}$  по формуле (3.203) получим  $\Delta x_{ym}(t) = 60,0 \cdot 0,012 / 0,127 \cdot 10^6 \cdot \pi 4 \cdot 10^{-6} = 0,451 \text{ м} = 451 \text{ мм}$ .



Рисунок 3.39 – Теоретическая прямая, построенная по выражению (3.203), перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке в зависимости от приложенного к жидкостному поршню перепада давления от утечек сжатого воздуха из изделия, испытываемого на герметичность, в пределах зоны нечувствительности перемещения жидкостного поршня от перепада давления, при подаче периодических возмущений по давлению (перемещению жидкостного поршня) в устройство испытаний

#### 3.4.5 Движение жидкостного поршня в горизонтальной трубке без учета инерционных сил и силы вязкого трения

Если в уравнении (3.173) принять, как это делается в работе [75] для дифференциальных уравнений моментов сил, содержащих звенья с сухим трением, что масса жидкостного поршня m и размерный коэффициент вязкого (линейного гидравлического) трения  $\kappa_{2.mp}$  незначительны, то есть,  $m = \kappa_{2.mp} = 0$ , тогда получим

$$\frac{E_{z}F_{mp}^{2}}{V_{us}}x(t) + N_{\sigma}Sign \ x(t) = \Delta P_{2}(t)F_{mp} \quad \text{при} \ x(t) \neq 0$$
  
при  $x(t) = 0$  и  $|\Delta P_{2}(t)|F_{mp} > N_{\sigma};$  (3.204)  
 $x = const$  при  $x(t) = 0$  и  $|\Delta P_{2}(t)|F_{mp} < N_{\sigma}.$ 

ИЛИ

На рисунке 3.40 представлена характеристика этого нелинейного звена с учетом воздействия поверхностного натяжения жидкости на движение жидкостного поршня в горизонтальной трубке (аналогичного сухому трению), где  $\kappa_{_{\mathcal{I}}} = tg\varphi = x(t) / \Delta P_2(t)F_{_{mp}} = V_{_{u3}} / E_{_{\mathcal{I}}}F_{_{mp}}^2$ ;  $N_{\sigma} = m$ ;  $\varphi = arctg \left(V_{_{u3}} / E_{_{\mathcal{I}}}F_{_{mp}}^2\right)$ . В работе [75] отмечается, что «сухое трение в таком нелинейном звене», по выражению (3.204), «эквивалентно зазору, половина которого равна *с*, чего совершенно нельзя сказать о сухом трении в следящей системе, где учитывалась масса». В нашем примере характеристика, представленная на рисунке 3.40, не учитывает инерционные силы и силы вязкого трения и подобна нелинейной характеристике типа «люфт». В реальности это происходит тогда, когда жидкостный поршень имеет малую массу и перемещается в горизонтальной трубке с малой скоростью, что обычно наблюдается на практике.

В установках контроля герметичности жидкостный поршень в горизонтальной трубке перемещается с очень малой скоростью из-за малых допустимых утечек из изделий, например, классов герметичности А и В. Из этих положений следует возможность проведения исследований движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке по выражению (3.204) и нелинейной характеристике, представленной на рисунке 3.40.



Рисунок 3.40 – Нелинейная характеристика, построенная по выражению (3.204)

Построенная по выражению (3.204) нелинейная характеристика перемещения жидкостного поршня x(t) в горизонтальной трубке от приложенной к жидкостному поршню силы  $\Delta N_2(t)$ , пропорциональной перепаду давлений  $\Delta P_2(t)$ , из-за утечек газа из изделия представлена линиями 1 на рисунке 3.41.

В работах [75, 77, 78, 79] при рассмотрении метода гармонической линеаризации нелинейных характеристик представлены графики, изображающие нелинейные характеристики, на которые накладывается характеристика синусоидального изменения параметра во времени, производится их графическое суммирование и получают результирующую характеристику. Во всех этих и других работах характеристика синусоидального изменения параметра подается симметрично вертикальной оси координат для нелинейной характеристики.

В настоящей работе предлагается для исследования влияния перепада давления  $\Delta P_2(t)$  [пропорционального силе  $\Delta N_2(t)$ ] на жидкостном поршне от утечек газа из изделия, меньшего чем перепад давлений, создаваемый на жидкостном поршне от воздействия поверхностного натяжения жидкости в горизонтальной трубке, производить смещение (например, кривой 3 в положение кривой 4 на рисунке 3.41) характеристики синусоидального изменения давления  $\Delta P_2(t)$  [силы  $\Delta N_2(t)$ ] во времени на значение перепада давлений (силы) от утечек газа. Это значение смещения силы обозначено через  $m_0$ , H, и может оно изменяться в пределах -  $m \le m_0 \le m$ , где  $m = N_{\sigma}$ , H.

Периодическое (синусоидальное) изменение давления (силы) во времени в устройстве испытаний отражено кривой 3. В результате периодического изменения давления (силы) в устройстве испытаний по кривой 3 перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке во времени происходит по кривой 5. Амплитудные значения колебания (перемещения) жидкостного поршня в горизонтальной трубке от какого – либо реперного положения определяются величинами  $A_1$  и  $A_2$ . Размах колебаний составляет  $A_1$ -  $A_2$ , амплитуда колебаний -  $(A_1-A_2)/2$ .

Допустим, что утечки газа из изделия создают на жидкостном поршне силу (перепад давлений), равную половине m/2 от значения  $N_{\sigma}$  (или другое значение в пределах от 0 до m), тогда необходимо начало кривой 3 периодического изменения силы (давления) в устройстве испытаний сместить вправо по оси силы на m/2 (или любое другое значение в пределах от 0 до m). Кривая 3 в этом случае занимает положения кривой 4. После графического сложения кривой 4 с нелинейной характеристикой 1 получим кривую 6.

Характерной особенностью кривой 6 является то, что она начинается со средней точки прямого участка, расположенного левее кривой 5 (при силе, равной  $N_{\sigma} = m$ , приложенной к жидкостному поршню начало кривой 6 было бы расположено в левой точке прямого участка, расположенного левее кривой 5).



1, 2 - нелинейная характеристика движения жидкостного поршня в трубке без учета инерционных сил и силы вязкого трения: исходное и смещенное положения; 3, 4 – приложенное периодическое изменение разности давлений (силы) на жидкостном поршне в горизонтальной трубке при перепаде давлений (силе) на жидкостном поршне от утечек газа из изделия, равного нулю (кривая 3) и половине перепада давления (силы), создаваемого поверхностным натяжением жидкости (воды) (кривая 4); 5, 6 - перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке во времени при возмущениях по кривым 3 и 4

Рисунок 3.41 – Графики движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке без учета инерционных сил и силы вязкого трения при периодических возмущениях давления (силы) пробной среды Второй особенностью является увеличение начального максимального значения амплитуды отклонения кривой 6 до  $A_3$ , а минимального значения амплитуды до  $A_4$  и, что особенно является важным - смещение нелинейной характеристики 1 в положение 2 после первого периода колебаний перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке. Новое колебание жидкостного поршня по кривой 6 происходит симметрично новой горизонтальной оси *t*. Смещение горизонтальной оси, то есть, изменение перемещения жидкостного поршня на  $\Delta x(t)$  от приложенной силы (перепада давлений) к жидкостному поршню от утечек газа из изделия, как видно по кривым 5 и 6 (рисунок 3.41), с учетом того, что по (3.204)  $\kappa_n = tg\varphi = x(t) / \Delta P_2(t) F_{mp} = V_{u3} / E_2 F_{mp}^2$ , определяется выражением

$$\Delta x_{ym}(t) = 0.5(A_3 + A_4) - 0.5(A_1 + A_2) = A_3 - A_1 = \kappa_n \cdot \Delta P_{ym}(t) \cdot F_{mp} = V_{u3} \Delta P_{ym}(t) / E_2 F_{mp} \cdot (3.205)$$

### **3.4.6** Контроль герметичности изделий при периодических возмущениях давления пробной среды в устройстве испытаний

В работе приводятся как теоретические, так и экспериментальные исследования по практической реализации предложенного метода автоматизированного контроля герметичности изделий при периодических возмущениях давления пробной среды или взаимосвязанного с ним параметра (уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры, положения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, положения мембран мембранного блока дифференциального манометра) в устройстве испытаний. В этот метод входят различные способы его реализации, например: с устройствами с горизонтальной трубкой, с пузырьковой камерой, с дифференциальным манометром.

Сущность метода автоматизированного контроля герметичности изделий при периодических возмущениях давления пробной среды для всех трех способов реализации (с горизонтальной трубкой, пузырьковой камерой, дифференциальным манометром) состоит в том, что измерение давления или взаимосвязанного с ним параметра в устройстве испытаний производится при периодических возмущениях давления пробной среды в изделии. Возмущения давления могут подводиться в устройство испытаний в течение всего времени контроля герметичности изделия или только в начале, а затем в конце контроля герметичности изделия.

В работе рассматривается в качестве примера более подробно контроль герметичности изделий с использованием устройств с горизонтальной трубки. Контроль герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки проводится по измеряемой разности соответствующих одноименных (максимальных или минимальных) амплитуд для различных возмущений перемещений жидкостного поршня в горизонтальной трубке или по разности средних арифметических значений (максимальных и минимальных в периоде колебания) амплитуд для различных возмущений перемещения.
Результаты контроля герметичности изделий по разности амплитуд перемещений жидкостного поршня при периодических возмущениях по давлению в устройстве испытаний полностью зависят от снижения давления в изделии от утечек газа и фактически исключается влияние поверхностного натяжения жидкости на движение жидкостного поршня в горизонтальной трубке.

Проведенные выше теоретические исследования показывают, что любой перепад давлений на жидкостном поршне от утечек газа из изделия, который меньше по значению, чем перепад давлений, создаваемый поверхностным натяжением жидкости, может быть измерен при возмущениях давления в изделии или устройствах испытаний и изделии. На рисунке 3.42 приведены фазовые траектории перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке устройства испытаний изделий на герметичность при периодических возмущениях и постепенном снижении давления в изделии от утечек пробного газа в пределах зоны нелинейности движения жидкостного поршня в трубке: 1 – фазовая траектория перемещения жидкостного поршня в трубке при возмущении давления пробной среды в начале контроля герметичности, когда перепад давлений на жидкостном поршне от утечек газа из изделия равен нулю и этот перепад давлений вызывает перемещение жидкостного поршня в трубке на расстояние  $b_0 = 0$ ; 2 – фазовая траектория перемещения жидкостного поршня в трубке в конце контроля герметичности при перепаде давлений на жидкостном поршне от утечек газа из изделия, который вызывает перемещение жидкостного поршня в трубке на расстояние  $0 \le b_0 \le b$  или большее b при возмущении по давлению пробного газа в изделии.

Значение  $b_0$  характеризует перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке от перепада давлений на жидкостном поршне трубки из-за утечек газа из изделия, который меньше перепада давлений создаваемого поверхностным натяжением жидкостного поршня в трубке.

Зона нечувствительности в перемещении жидкостного поршня в трубке, зависящая от сил поверхностного натяжения жидкости и диаметра горизонтальной трубки, обозначена как b + |(-b)| = 2b. Если, например, за время испытаний разность давлений на жидкостном поршне понизилась на столько, что соответствует изменению перемещения жидкостного поршня на значение меньшее, чем  $\pm b$ , то это перемещение не может быть измерено горизонтальной трубкой обычным способом потому, что эта разность давлений меньше по значению разности давлений приложенной к жидкостному поршню в трубке со стороны жидкости за счет воздействия поверхностного натяжения.

Однако, это значение и другие меньшие или большие значения перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке a, м, могут быть определены по разности амплитуд как значение  $a = A_2 - A_1$  или  $a = A_3 + A_4$  за установленное время контроля, при котором учитывается перепад давлений на жидкостном поршне как меньший по значению, когда  $a = b_0 \le b = A_3 + A_4$  или  $a = b_0 \le b = A_2 - A_1$ , так и больший по значению, когда  $a > b = A_2 - A_1$  или  $a > b = A_3 + A_4$ , чем зона нечувствительности перемещения жидкостного поршня в трубке, связанная с силами поверхностного натяжения жидкости (рисунок 3.42). Это существенно расширяет возможности устройства для испытаний изделий на герметичность с использованием горизонтальной трубки и подводимых в устройство периодических возмущений давления.



1, 2 – фазовые траектории перемещения жидкостного поршня в трубке при возмущении в начале и в конце контроля герметичности; I-I и II-II - линии, указывающие на промежуток времени между возмущениями

Рисунок 3.42 - Фазовые траектории перемещения жидкостного поршня в зоне нечувствительности от воздействия сил поверхностного натяжения жидкости в горизонтальной трубке устройства испытаний изделий на герметичность при периодических возмущениях и постепенном снижении давления в изделии от утечек газа

Экспериментальный объем утечек газа из изделия  $V_{ym}$ , м<sup>3</sup>, при использовании устройств с горизонтальной трубкой и при периодических возмущениях давления пробной среды, по которому делают заключение о герметичности изделия, вычисляют по выражению

$$V_{ym} = a \cdot F_{mp}, \qquad (3.206)$$

где *F<sub>mp</sub>*- площадь сечения горизонтальной трубки, м<sup>2</sup>.

3.5 Основы теории и совершенствование манометрического метода и устройств с дифференциальным манометром испытаний изделий на герметичность

## 3.5.1 Типовая схема испытаний изделий на герметичность с использованием дифференциальных манометров

Типовая схема испытаний изделий на герметичность пробным газом с использованием дифференциальных манометров приведена на рисунке 3.43, которая содержит эталонную емкость 1, изделие 3, дифференциальный манометр (дифманометр) 10, вторичный показывающий или регистрирующий прибор 8 и вентили 2, 4, 5, 6, 7 и 9.



Рисунок 3.43 - Схема устройства испытаний изделий на герметичность изделий пробным газом с использованием дифференциального манометра

Перед испытаниями изделия 3 на герметичность его подключают через вентиль 2 к устройству испытаний. Закрывают вентили 5 и 6, открывают вентили 4, 9 и 7 и заполняют пробным газом заданного давления эталонную емкость, изделие и полости дифманометра. Закрывают вентили 4 и 7 и открывают вентили 5 и 6.

После этого закрывают вентиль 9 и испытывают изделие в течение заданного промежутка времени. О герметичности изделия делают заключение по показаниям прибора 8, соединенного с дифманометром 10.

#### 3.5.2 Выбор объема эталонной емкости при испытаниях изделий газом с использованием дифманометров

На рисунке 3.44 представлена упрощенная схема подключения дифманометра к эталонной емкости и изделию при испытаниях изделий на герметичность с использованием устройства, более полная схема которого приведена на рисунке 3.43.

Одними из наиболее возможных к применению для испытаний изделий на герметичность являются мембранные дифманометры типа ДМ, ДМЭР, «Сапфир» и другие. Дифманометры типа ДМ, выпускаемые промышленностью, имеют минимальный перепад давлений, равный 1600 Па, класс точности 1,5, мембранную коробку диаметром 60 мм и ход сердечника ±1,5; 2,0 и 2,5 мм.



Рисунок 3.44 – Схема подключения дифманометра к эталонной емкости и изделию при испытаниях изделий на герметичность газом

Дифманометры типа ДМЭР имеют минимальный перепад давлений, равный 4000 Па, а типа «Сапфир» выпускаются на минимальные перепады давлений, равные 250; 400; 630 Па, имеют гофрированную мембрану диаметром 120 мм [80], класс точности 0,5 или 1,0 и ход гофрированной мембраны 0,3 мм.

Выбираем, например, дифманометр с наименьшим перепадом давлений (на 250 Па) типа «Сапфир». При перепаде давлений на дифманометре, равном 250 Па, гофрированная мембрана диаметром 120 мм смещается на 0,3 мм. Так как мембрана по наружной окружности зажата, то принимаем, что при ее деформации образуется конус высотой 0,3 мм и основанием 120 мм. Объем такого конуса, то есть изменение объема камеры дифманометра  $\Delta V_{10}$ , м<sup>3</sup>,

$$\Delta V_{1\partial} = (1/3)\pi R^2 h, \qquad (3.207)$$

где *R* – радиус гофрированных мембран мембранной коробки дифманометра, м;

h - перемещение гофрированной мембраны в дифманометре при полном перепаде давлений на нем, м<sup>3</sup>.

Для принятых значений величин  $\Delta V_{Io} = (1/3)\pi R^2 h = (1/3)\pi \cdot (0,06)^2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} = 11,30983 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3.$ 

При испытаниях изделия 2 на герметичность из него в атмосферу выходит газ в виде утечек с массовым расходом  $G_2$  (рисунок 3.44), а через дифманометр 6 проходит (условно) газ расходом  $G_1$ . Расход газа  $G_1$  представляет результат следующих процессов.

При утечке газа из изделия уменьшается масса газа и давление в изделии, в результате этого гофрированная мембрана дифманометра 6 смещается в сторону изделия и объем полости дифманометра, соединенной с эталонной емкостью, увеличивается. Поэтому давление в эталонной емкости понижается.

На рисунке 3.45 горизонтальной пунктирной линией показано начальное значение давления в изделии и эталонной емкости. При испытаниях изделия на герметичность в нем давление снижается по прямой  $P_2$ , но давление в эталонной емкости при этом снижается по прямой  $P_1$ .

Измеряемое значение перепада давлений дифманометром равно  $\Delta P_2$ , и по этому значению перепада давлений делают заключение о герметичности изделия. Фактически же падение давления в изделии составляет  $\Delta P_3$  потому, что давление в эталонной емкости снижалось по прямой  $\Delta P_1$ . В результате этого измеренные утечки газа из изделия оказываются значительно меньше фактических утечек.

Проведем ориентировочную оценку дополнительных не учтенных утечек газа из изделия при его испытаниях за счет учета снижения давления газа в эталонной емкости от перемещения дополнительной части газа в дифманометр.

В исходном состоянии в эталонной емкости объемом  $V_1 = 0,01 \text{ м}^3$  и при давлении  $P_1 = 0,6$  МПа накоплена энергия газа  $P_1V_1$ , Па·м<sup>3</sup>, равная  $P_1V_1 = 0,6\cdot 10^6\cdot 10\cdot 10^{-3} = 6\cdot 10^3 \text{ Па·м}^3 = 6\cdot 10^3 \text{ H·м}.$ 



Рисунок 3.45 – Изменение давлений в эталонной емкости и изделии при испытаниях изделия на герметичность

Объем эталонной емкости и присоединенной к ней полости дифманометра увеличился на  $\Delta V_{I\partial} = 11,30983 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$  и составляет  $(V_1 + \Delta V_{I\partial}) = 0,01 + 11,30983 \cdot 10^{-7} = 1000,1130983 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ . Давление в эталонной емкости при увеличенном объеме  $P_{1C}$ , Па, составляет  $P_{1C} = P_1 V_1 / (V_1 + \Delta V_{I\partial})$  или  $P_{1C} = (6 \cdot 10^3)/1000,1130983 \cdot 10^{-5} = 599932$  Па.

Снижение давления в эталонной емкости  $\Delta P_{1C}$ , Па,  $\Delta P_{1C} = P_1 - P_{1C}$  или  $\Delta P_{1C} = 600000 - 599932 = 68$  Па для рассматриваемого дифманометра с перепадом давлений 250 Па, что составляет 27,2 % от общего перепада на дифманометре.

Если изделие испытывать не давлением 0,6 МПа, а при 0,15 МПа, как для автотракторных теплообменников, тогда в исходном состоянии в эталонной емкости накоплена энергия газа, равная  $P_1V_1 = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,15 \cdot 10^6 = 1,5 \cdot 10^3$  Па·м<sup>3</sup>. Объем эталонной емкости и дифманометра увеличился на 11,30983 ·  $10^{-7}$  м<sup>3</sup> и составляет 0,01 + 11,30983 ·  $10^{-7} = 1000,1130983 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>.

Давление в эталонной емкости при увеличенном объеме составляет  $P_{1C} = (1,5 \cdot 10^3)/1000,1130983 \cdot 10^{-5} = 149983$  Па. Снижение давления в эталонной емкости  $\Delta P_{1C} = 150000 - 149983 = 17$  Па и для рассматриваемого дифманометра с перепадом давлений 250 Па составляет 6,9 % от общего перепада на дифманометре.

Для дифманометра типа ДМ с перепадом давлений 200 Па снижение давлений в эталонной емкости  $\Delta P_{1C}$  составляет 170 Па потому, что в этом дифманометре объем воздуха, который входит дополнительно в камеру составляет не 11,30983 · 10<sup>-7</sup>, а 28,26 · 10<sup>-7</sup> м<sup>3</sup> и общий объем 0,01 + 28,26 · 10<sup>-7</sup> = 1000,2826 · 10<sup>-5</sup> м<sup>3</sup>.

Изменение объема для мембранного блока диаметром 60 мм при смещении мембраны на 1 мм  $\Delta V_{I\partial} = \pi \cdot (6 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}/4 = 28,26 \cdot 10^{-7} \cdot 28,26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$ , тогда  $P_{1C} = (6 \cdot 10^3)/1000,2826 \cdot 10^{-5} = 599830$  Па. Снижение давления в эталонной емкости  $\Delta P_{1C} = 600000 - 599830 = 170$  Па для дифманометра типа ДМ с перепадом давлений 1600 Па, что составляет 10,6 % от общего перепада на дифманометре.

Если провести такие же расчеты, но при объеме эталонной емкости большем объема изделия, тогда можно уменьшить погрешность от влияния изменения объема полости дифманометра, присоединенной к эталонной емкости до 0,5 – 2,5 %.

Установим теоретические соотношения для выбора объема эталонной емкости при испытаниях изделий на герметичность газом с использованием дифманометра.

После заполнения всех элементов устройства испытаний изделий газом (рисунок 3.44) и разъединения полостей дифманометра, эталонной емкости и изделия в эталонной емкости и соединенной с ней камере дифманометра имеется энергия, равная  $P_1V_1$ , Па·м<sup>3</sup>. При изменении объема полости дифманометра, соединенной с эталонной емкостью, на  $\Delta V_{1\partial}$ , м<sup>3</sup>, давление в эталонной емкости и присоединенной к ней полости дифманометра  $P_1^1$ , Па, определяется по выражению

$$P_1^1 = P_1 V_1 / (V_1 + \Delta V_{1\partial}). \tag{3.208}$$

Абсолютная погрешность изменения давления в эталонной емкости и присоединенной полости дифманометра  $\Delta_{1\partial}$ , Па, составляет

$$\Delta_{I\partial} = P_I - P_1^1 = P_1 \Delta V_{1\partial} / (V_1 + \Delta V_{1\partial}).$$
(3.209)

При испытаниях на герметичность изделий необходимо выбирать допустимое значение изменения давления в эталонной емкости и присоединенной полости дифманометра  $\Delta P_{1\partial}$ , Па. Тогда (3.209) принимает вид

$$\Delta_{I\partial} = P_{I} \Delta V_{I\partial} / (V_{I} + \Delta V_{I\partial}) \leq \Delta P_{I\partial}.$$
(3.210)

Из этого выражения определяем объем эталонной емкости  $V_1$ , который необходимо выбирать для обеспечения понижения в ней давления, не превышающего установленного,

$$V_1 > \Delta V_{1\partial} (P_1 - \Delta P_{1\partial}) / \Delta P_{1\partial} . \tag{3.211}$$

Например, если  $\Delta P_{1\partial} = \pm 1$  Па,  $P_1 = 0.6$  МПа =  $6 \cdot 10^5$  Па,  $\Delta V_{1\partial} = 11,30983 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>, тогда объем эталонной емкости должен быть более 0,679 м<sup>3</sup>. Если  $\Delta V_{1\partial} = 28,26 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>, тогда объем эталонной емкости должен быть более 1,696 м<sup>3</sup>.

Выбор объема эталонной емкости по формуле (3.211) при  $\Delta P_{1\partial} = \pm 1$ Па означает, что при полном перепаде на дифманометре при испытаниях, равном, например, 250 Па и имеющим  $\Delta V_{1\partial} = 28,26 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>, эталонная емкость обеспечит с точностью 0,4 % (1 Па от 250 Па) поддержание первоначального объема эталонной емкости, несмотря на то, что объем камеры дифманометра будет изменяться от нуля до  $\Delta V_{1\partial}$ , равного, например, 28,26·10<sup>-7</sup> м<sup>3</sup>.

Относительная погрешность изменения давления в эталонной емкости и присоединенной полости дифманометра при испытаниях изделий по дифференциальной схеме с использованием дифманометра  $\beta$ , %, определяется по следующему выражению

$$\beta = \frac{P_1 - P_1^1}{P_1} \cdot 100 = \frac{\Delta V_{1\partial}}{V_1 - \Delta V_{1\partial}} \cdot 100.$$
 (3.212)

## 3.5.3 Разработка способа и устройств испытаний на герметичность изделий с использованием изменяемых дополнительных емкостей

Повышение чувствительности устройств испытаний на герметичность изделий по разности давлений достигается путем применения способа испытаний на герметичность с использованием изменяемых дополнительных емко-

стей [81]. Одно из устройств, реализующее данный способ, приведено на рисунке 3.46.

Устройство содержит эталонную емкость 1, изделие 2, дифманометр 3, источник 4 пробного газа, дополнительные емкости 5 и 6 равного объема, привод 7, опорную пластину 8, регулируемые опоры 9 -12 и запорные вентили 13-16. Первая дополнительная емкость 5 соединена с левым входом дифманометра 3 и через вентиль 13 с эталонной емкостью 1.

Вторая дополнительная емкость 6 соединена с вторым входом дифманометра 3 и через вентили 14 и 15 соответственно с изделием 2 и источником 4 пробного газа. Дополнительные емкости 5 и 6 выполнены, например, в виде сильфонов. Одни торцы сильфонов жестко закреплены к основанию устройства, а другие – к подвижной пластине 8. Последняя соединена с подвижной частью привода 7.

Пластина 8 в исходном состоянии опирается на опоры 9 и 10, а при сжатии сильфонов – на опоры 11 и 12. Геометрические размеры сильфонов выбираются из условия равенства вытесняемых объемов при перемещении опорной пластины 8 с опор 9 и 10 на опоры 11 и 12. Для компенсации погрешностей от неточности геометрических размеров сильфонов опоры 9 – 12 выполнены регулируемыми.



Рисунок 3.46 - Схема устройства испытаний на герметичность изделий с использованием изменяемых дополнительных емкостей

После завершения испытаний изделия 2 в течение заданного промежутка времени и отсоединения дополнительных емкостей 5 и 6 от эталонной емкости 1 и изделия 2 в дополнительной емкости 5 давление газа составляет  $P_1$ , а в дополнительной емкости 6 –  $(P_1 - \Delta P)$ .

На основании того, что для изотермического процесса существует соотношение  $PV = \text{const} (P - \text{давление газа в изделии, Па; } V - объем газа в изделии, м<sup>3</sup>), при уменьшении дополнительных емкостей 5 и 6 в <math>\kappa$  раз, давления в них возрастут в  $\kappa$  раз и измеряемая дифманометром 3 разность давлений также увеличивается в  $\kappa$  раз и составит

$$\Delta P_{u3} = \kappa P_1 - \kappa (P_1 - \Delta P) = \kappa \Delta P, \qquad (3.213)$$

где  $\Delta P_{u3}$  – измеряемая дифманометром разность давлений, Па, между эталонной емкостью и изделием, испытываемым на герметичность, после того, как проведено сжатие дополнительных емкостей 5 и 6 на объем (для каждой емкости), равный  $\Delta V$ ;

 $\Delta P$  – разность давлений, Па, между эталонной емкостью и изделием до сжатия дополнительных емкостей 5 и 6 на объем (для каждой емкости), равный  $\Delta V$ ;

*к* – коэффициент повышения давлений и разности давлений между эталонной емкостью и изделием после сжатия дополнительных емкостей 5 и 6.

Основными величинами, влияющими на реализацию способа испытания изделий на герметичность, являются:

- объемы дополнительных емкостей  $V_{k1}$  и  $V_{k2}$ , причем  $V_{k1} = V_{k2} = V_k$ ;

- объемы полостей дифманометра 3 совместно с объемами трубопроводов, соединяющими дополнительные емкости с дифманометром 3  $V_{\partial 1}$  и  $V_{\partial 2}$ , полагая, что  $V_{\partial 1} = V_{\partial 2} = V_{\partial}$  и

- коэффициент увеличения давлений и разности давлений к в дополнительных емкостях 5 и 6 по сравнению с первоначальной разностью давлений и давлениями в эталонной емкости 1 и изделии 2.

Объем каждой из дополнительных емкостей совместно с объемом трубопроводов, соединяющих емкость с дифманометром, составляет  $(V_k + V_{\partial})$ , то есть  $(V_{k1} + V_{\partial 1})$  и  $(V_{k2} + V_{\partial 2})$ . После сжатия каждой из дополнительных емкостей на объем, равный  $\Delta V$ , объем этих емкостей будет равным  $(V_k + V_{\partial}) - \Delta V$ . Относительное изменение объема емкостей (каждой из двух рассматриваемых по этому способу) составит

$$k = \frac{V_k + V_\partial}{V_k + V_\partial - \Delta V}, \qquad (3.214)$$

где  $\kappa$  – коэффициент уменьшения объема емкостей при их сжатии, который является также коэффициентом повышения давления в емкостях при их сжатии. Этот вывод вытекает из следующего представления соотношения PV = const

$$(kP) \cdot (V/k) = \text{const.} \tag{3.215}$$

Абсолютное уменьшение объемов дополнительных емкостей 5 и 6 при относительном увеличении в них давления в *к* раз, с учетом объемов полостей дифманометра и соединительных трубопроводов согласно соотношению (3.214), определяется по формуле

$$\Delta V = \Delta V_{k1} = \Delta V_{k2} = (V_k + V_d)(1 - 1/\kappa), \quad \text{при } \Delta V < V_k,$$

где  $\Delta V$ ,  $\Delta V_{kl}$ ,  $\Delta V_{k2}$  – изменение объема емкостей (общее обозначение) и емкостей 5 и 6 при их сжатии.

Условие  $\Delta V < V_k$  означает, что объем пробного газа, находящийся в дополнительных емкостях 5 и 6, полостях дифманометра и соединительных трубопроводах, можно уменьшить (сжать) только на величину меньшую, чем объем дополнительных емкостей 5 или 6. Из этого условия следует, что

$$(V_k + V_o)(1 - 1/\kappa) < V_k, (3.216)$$

а поэтому  $V_{\partial} < V_k / (k-1)$  или  $V_k > (k-1)V_{\partial}$ . (3.217)

Например, при разработке устройства испытаний на герметичность изделий, в котором коэффициент повышения давления  $\kappa = 25$ , объем полости дифманометра 3 и соединительных трубопроводов  $V_0 = 60$  см<sup>3</sup>, объем дополнительной емкости 5 или 6 должен быть  $V_k > (25 - 1) 60 = 1440$  см<sup>3</sup> = 1,44 дм<sup>3</sup>.

В качестве дополнительных емкостей 5 и 6 используют, например, многослойные сварные сильфоны из нержавеющей стали на статическое давление до 15 МПа. В качестве дифманометра 3 используют, например, мембранный дифманометр типа ДМ-3573 на статическое давление 25 МПа и пределы измерения 0 - 1600 Па.

Давление пробного газа в эталонной емкости 1 и изделии 2, испытываемом на герметичность, например, для автотракторных теплообменников составляет 0,12 МПа. С учетом давления, равного 0,12 МПа, и предельного давления в сварных сильфонах (15 МПа) коэффициент повышения давления не должен превышать  $\kappa = 125$ .

### 3.5.4 Разработка устройства испытаний на герметичность изделий без их разгерметизации

Исследование атмосферы, околоземного пространства или глубоководных слоев океанов требует производства специальной аппаратуры, испытания на герметичность которой должен проводиться без их разгерметизации и непосредственного подключения к внутренним полостям с большой вероятностью достоверности контроля и повторяемости результатов измерения.

Устройство, схема которого приведена на рисунке 3.47, содержит изделие 1, камеру 2, кожух 3, эталонную емкость 4, измерители давления 5, 6 и 7, источник пробного газа 8 и вентили 9 – 12. Внутренняя полость камеры 2 соединена с эталонной емкостью через вентиль 9 и с измерителем давления 5.

Зазор между камерой и кожухом соединен с измерителем давления 6 и источником пробного газа через вентиль 10. Эталонная емкость 4 через вентиль 11 соединена с источником пробного газа 8. Вентиль 12 сообщает полости камеры 2 и эталонной емкости 4 с атмосферой.



Рисунок 3.47 – Схема устройства испытаний на герметичность изделий без их разгерметизации

Для испытаний на герметичность изделия без разгерметизации заполняют зазор между камерой и кожухом пробным газом заданного давления от источника 8. Закрывают вентили 10, 9 и 12 и по измерителям давления 5 и 6 констатируют о герметичности кожуха и камеры. В этом случае давление по измерителю 6 не должно снижаться, если герметичны кожух и камера, а давление по измерителю 5 не должно подниматься, если герметична камера.

После этого открывают вентиль 12, сообщают кратковременно полость камеры с атмосферой, а затем закрывают вентиль 12. Открывают вентиль 11 и заполняют эталонную емкость пробным газом до заданного давления, наблюдая по измерителю 7. Закрывают вентиль 11 и открывают вентиль 9. После выравнивания давления в камере и эталонной емкости закрывают вентиль 9 и выдерживают изделие под избыточным давлением в течение заданного промежутка времени. О герметичности изделия делают заключение по разности давлений между расчетным давлением в камере и измеренным давлением измерителем 5.

Расчетное давление в камере 2 (рисунок 3.47)  $P_p$ , Па, определяют по выражению

$$P_p = \frac{V_e P_e + (V_k - V_u) P_0}{V_k + V_e - V_u},$$
(3.218)

где  $V_e$ ,  $V_k$ ,  $V_u$  – объем эталонной емкости 4, предварительно заполняемой пробным газом, объем камеры 2, в которую размещают испытываемое на герметичность изделие, и объем изделия м<sup>3</sup>;

*P<sub>e</sub>*, *P<sub>0</sub>* – давление пробного газа в эталонной емкости и начальное давление в камере 2, которое равно атмосферному давлению, Па.

Давление пробного газа в эталонной емкости 4  $P_e$ , Па, зависит от давления, при котором проводят испытания изделия на герметичность  $P_p^1$ , Па, и определяют по формуле

$$P_e = \left[ P_p^1 (V_k + V_e - V_u) - P_0 (V_k - V_u) \right] / V_e .$$
(3.219)

### **3.6 Основы теории и совершенствование гидростатического метода и** устройств испытаний изделий на герметичность

## 3.6.1 Базовый гидростатический метод испытаний изделий на герметичность

В соответствии с ГОСТ 24054-80 [5] к группе методов испытаний изделий на герметичность жидкостью относится гидростатический метод, который имеет следующие способы реализации: компрессионный, внешней опрессовки и капиллярный. Наиболее распространенным способом реализации гидростатического метода на предприятиях различных отраслей народного хозяйства страны является компрессионный способ. При компрессионном способе реализации гидростатического метода изделие заполняют пробной жидкостью и выдерживают в течение определенного времени. О негерметичности изделия судят по появлению капель или пятен на поверхности изделия или индикаторной массе, нанесенной на эту поверхность.

Основным недостатком гидростатического метода является отсутствие количественных показателей негерметичности изделий. Стандартами России устанавливаются в настоящее время конкретные числовые значения утечек жидкости в единицу времени в зависимости (например, по ГОСТ 9544-93 [6] для затворов трубопроводной арматуры) от класса герметичности изделия. Причем по классу герметичности А для изделий не допускается появление видимых утечек жидкости и указывается, что измерение утечек жидкости при этом должно производиться с погрешностью не превышающей  $\pm 0,01$  см<sup>3</sup>/мин для утечек менее 0,1 см<sup>3</sup>/мин.

Практически при испытаниях изделий гидростатическим методом оценку негерметичности изделия делают по снижению показаний манометра, по которому устанавливают необходимое давление пробной жидкости в изделии. Определение негерметичности изделий, испытываемых жидкостью, по снижению показаний манометра имеет кроме отмеченного недостатка по отсутствию количественных значений утечек, большое время испытаний и недостаточную точность контроля герметичности.

Если изделие принято герметичным, так как снижения показаний по манометру практически не наблюдалось, то это не означает, что изделие действительно герметично. Например, при испытательном давлении, равном 6,4 МПа используется манометр с диапазоном измерения от 0 до 10 МПа с погрешностью измерения  $\pm 1,6$  %. Эта погрешность составляет для выбранного манометра  $\pm 160000$  Па. Если учесть, что оператор допускает ошибку в пределах класса точности прибора, тогда погрешность составляет  $\pm 320000$  Па. Такому огромному понижению давления соответствует неучтенная утечка жидкости из изделия при испытаниях изделий известным гидростатическим методом.

### 3.6.2 Разработка пузырькового камерного способа реализации гидростатического метода

3.6.2.1 Пузырьковый камерный способ реализации гидростатического метода при равенстве давлений пробной жидкости и индикаторного газа

Основной недостаток гидростатического метода испытаний изделий на герметичность пробной жидкостью с компрессионным способом реализации, как отмечалось выше, состоит в отсутствии количественных значений суммарных утечек пробной жидкости из изделия.

На рисунке 3.48 изображена схема устройства для реализации способа испытаний изделий на герметичность жидкостью с использованием пузырьковой камеры. Устройство содержит пузырьковую камеру 1, воздушная полость которой соединена с камерой 2. В камере 2 расположена упругая емкость 3 (например, сильфон), внутренняя полость которой соединена с изделием 4.

Трубка 5 пузырьковой камеры 1 соединена с эталонной емкостью 6. Полость эталонной емкости соединена через вентиль 7 с полостью камеры 2, а воздушная полость пузырьковой камеры 1 соединена через вентиль 8 с атмосферой. Источник 9 газа соединен через вентиль 10 с полостью эталонной емкости 6.



Рисунок 3.48 - Схема устройства для испытаний изделий пробной жидкостью на герметичность с использованием пузырьковой камеры

Источник 11 жидкости соединен через вентиль 12 с полостями изделия 4 и упругой емкости 3. Объем полости эталонной емкости 6 выбирают исходя из условия обеспечения выделения пузырьков при допустимой утечке из изделия известного объема с заданной погрешностью.

Способ реализуется следующим образом. Исходя из объема изделия 4, допустимой утечки и заданной погрешности определяют объем эталонной емкости 6. Одновременно заполняют под контрольным давлением жидкостью изделие 4 и упругую емкость 3, расположенную в камере 2, а газом - выбранную эталонную емкость 6, пузырьковую камеру 1 и камеру 2 с упругой емкостью 3.

Закрывают вентили 12, 7 и 10. В результате этого эталонная емкость 6, барботажная трубка 5, пузырьковая камера 1, камера 2, упругая емкость 3 и изделие 4 оказываются соединенными последовательно по действующему в этих устройствах давлению газа и жидкости.

Если изделие 4 не герметично, тогда давление жидкости в изделии 4 и в упругой емкости 3 понижается. Регистрируют выделяющиеся из трубки пузырьковой камеры пузырьки газа (их количество) в течение установленного времени, по которым судят о негерметичности изделия.

Таким образом, способ и его реализация позволяют измерять суммарные утечки жидкости из изделия при контроле его герметичности жидкостью по пузырькам контрольного газа в жидкости пузырьковой камеры. 3.6.2.2 Пузырьковый камерный способ реализации гидростатического метода при неравных давлениях пробной жидкости и индикаторного газа

На рисунке 3.49 изображена схема устройства для реализации способа испытания изделий на герметичность жидкостью с использованием пузырьковой камеры для тех случаев, когда испытательное давление жидкости больше давления газа в эталонной емкости.



Рисунок 3.49 - Схема устройства для реализации способа испытаний изделий на герметичность жидкостью с использованием пузырьковой камеры при испытательном давлении жидкости не равном давлению газа в ресивере

Способ реализуется следующим образом. Исходя из объема изделия 2, допустимой утечки и заданной погрешности определяют объем эталонной емкости 6. Заполняют под контрольным давлением жидкостью изделие 2 и первую упругую емкость 4, а газом – выбранную эталонную емкость 6, пузырьковую камеру 1 и вторую упругую емкость 14.

Закрывают вентили 12, 7 и 10 и снижают уровень жидкости в барботажной трубке 5 до нижнего среза путем дросселирования газа из второй упругой емкости 14 в атмосферу через вентиль 8 до появления газовых пузырьков в жидкости пузырьковой камеры 1. Прекращают дросселирование газа в атмосферу через вентиль 8. Негерметичность изделия 2 определяют по объему газовых пузырьков, появляющихся после прекращения дросселирования газа в атмосферу через вентиль 8, в жидкости пузырьковой камеры 1. 3.6.2.3 Выбор геометрических размеров эталонной емкости при испытаниях изделий жидкостью пузырьковым камерным способом

Положения, которые приведены п. 3.1.4.3. для выбора геометрических размеров эталонной емкости для устройств с пузырьковой камерой при испытаниях изделий газом, фактически относятся и к выбору геометрических размеров эталонной емкости при испытаниях изделий жидкостью с использованием пузырьковой камеры.

Относительная погрешность  $\beta^l$ , %, измерения количества пузырьков сжатого воздуха в пузырьковой камере по отношению к количеству капель жидкости из изделия, суммарный объем которых равен объему газа, вошедшего в камеру 2 (рисунок 3.48), определяется по формуле

$$\beta^{1} = \left(1 - \frac{1}{1 + V_{en}/V_{pxc}}\right) \cdot 100, \qquad (3.220)$$

где

$$V_{6n} = V_{n\kappa} + V_{\kappa c} + V_{cn}, \qquad (3.221)$$

где  $V_{n\kappa}$ ,  $V_{\kappa c}$ ,  $V_{cn}$ ,  $V_{gn}$ ,  $V_{p \infty}$  – объем воздушной полости пузырьковой камеры 1, камеры 2, соединительных линий, соединяющих пузырьковую камеру 1 с камерой 2, и суммарный объем воздушной полости пузырьковой камеры 1, камеры 2 и соединительных линий, а также объем эталонной емкости, м<sup>3</sup>.

Сопоставляя полученные результаты для газового и жидкостного пузырькового камерного метода, следует отметить, что выбор геометрических размеров эталонной емкости, присоединенной к пузырьковой камере, проводится:

а) для пузырькового газового камерного метода по формуле  $V_p = (100'\beta - 1) \cdot V_u$ , из которой видно, что объем эталонной емкости пропорционален объему изделия;

б) для гидростатического метода с пузырьковым камерным способом реализации по формуле  $V_{p,m} = (100 / \beta^1 - 1) V_{6n}$ , из которой следует, что объем эталонной емкости не зависит от объема изделия и определяется конструктивными параметрами испытательной установки.

Из этих положений следует:

a) при создании установки для испытаний изделий газовым пузырьковым камерным методом необходимо предусматривать в качестве эталонной емкости набор емкостей определенных размеров для номенклатуры испытываемых изделий;

б) при создании установки для испытаний изделий гидростатическим (жидкостным) методом с пузырьковым камерным способом реализации необходимо предусматривать одну эталонную емкость, размеры которой зависят от объемов пузырьковой камеры, упругой емкости и соединительных линий.

## 3.6.3 Совершенствование дифференциального способа реализации гидростатического метода испытаний

3.6.3.1 Основные причины, препятствующие использованию дифференциального способа реализации гидростатического метода

На рисунке 3.44 представлена схема подключения дифманометра к эталонной емкости и изделию при испытаниях изделий на герметичность газом. Испытания изделий жидкостью с использованием дифманометра должны проводиться по аналогичной принципиальной схеме.

Однако, в практике испытаний изделий на герметичность жидкостью фактически дифманометры не используются. Рассмотрим основные причины, препятствующие использованию дифференциальных схем измерения разности давлений с использованием дифманометров при испытаниях изделий жидкостью.

Для сжимаемой жидкости [61]

$$\Delta V_1 / V_1 = \Delta P / E , \qquad (3.222)$$

где  $V_1$ ,  $\Delta V_1$  – объем жидкости в изделии и изменение объема жидкости в изделии при изменении давления в жидкости, м<sup>3</sup>;

 $\Delta P$  – разность давлений, которая приводит к изменению объема жид-кости на  $\Delta V_{l}$ , Па;

E - модуль упругости жидкости, Па. (Модуль упругости воды [61]  $E = 2100 \cdot 10^6$  Па).

Как отмечалось в п. 3.5.2, снижение давления в эталонной емкости и присоединенной к ней полости дифманометра не должно превышать от 1 до 5 Па, а изменения объема полости дифманометра, присоединенной к эталонной емкости  $\Delta V_{1\partial}$ , составляют для рассматриваемых дифманометров 11,30983 · 10<sup>-7</sup> и 28,26 · 10<sup>-7</sup> м<sup>3</sup> или 1130,98 и 2826,00 мм<sup>3</sup>.

Изменение объема жидкости  $\Delta V_1$  при  $\Delta P = 5$  Па,  $E = 2100 \cdot 10^6$  Па и объеме жидкости в изделии  $V_1 = 0,5$  м<sup>3</sup> составляет  $\Delta V_1 = V_1 \Delta P / E = 0,5 \cdot 5 / 2100 \cdot 10^6 = 1,19 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup> = 1,19 мм<sup>3</sup>.

Это значение, равное 1,19 мм<sup>3</sup>, по сравнению со значениями изменения объема полости дифманометра при испытаниях изделий на герметичность, равных 1130,98 и 2826,00 мм<sup>3</sup> составляет менее 0,1 %, то есть, изменения объемов полостей дифманометров, присоединенных к эталонной емкости в 950 – 2400 раз превышают допустимые изменения объемов.

Определим возможные максимальные понижения давления в эталонной емкости при испытании изделий жидкостью с использованием дифманометра, если изменение объема полости дифманометра, присоединенной к эталонной емкости, составляет 11,30983·10<sup>-7</sup> и 28,26·10<sup>-7</sup> м<sup>3</sup>:

$$\Delta P = E \cdot \Delta V_1 / V_1 = 2100 \cdot 10^6 \cdot 28,26 \cdot 10^{-7} / 0,5 = 11869,2 \ \Pi a$$

и 
$$\Delta P^{I} = 2100 \cdot 10^{6} \cdot 11,30983 \cdot 10^{-7} / 0,5 = 4750,2$$
 Па.

Изменения давлений очень большие по абсолютным значениям и фактически приведенные выше примеры доказывают о невозможности использования дифференциальной схемы испытаний изделий жидкостью с использованием эталонной емкости и дифманометров.

Однако, следует рассматривать испытания изделий с использованием дифманометра в сравнении с традиционным гидростатическим методом испытаний изделий, при котором используют показывающие манометры. Если, например, изделие необходимо испытывать на герметичность жидкостью при давлении 6,0 МПа, тогда выбирают манометр на 10 МПа, который имеет класс точности  $\pm 1$  %. Погрешность измерения давления в этом случае составляет  $\pm 0,1$  МПа =  $\pm 100000$  Па.

Сравнивая погрешность, равную ±100000 Па, для показывающего манометра, с погрешностью для рассматриваемых в п. 3.5.2 дифманометров, указанную в паспорте прибора и равную, например, ± 4 и 2, 5 Па для дифманометров с перепадом давлений 400 и 250 Па и классом точности 1 %, можно установить, что измерение изменения давления с использованием дифманометра происходит в 25 - 50 тысяч с меньшей погрешностью, чем при использовании показывающего манометра.

Однако, такое уменьшение погрешности при контроле герметичности изделий, как отмечалось выше, невозможно выполнить потому, что в системе испытаний используется эталонная емкость, подключаемая к дифманометру, в которой давление не должно изменяться во время испытаний.

Второй причиной, препятствующей применению дифференциального способа реализации гидростатического метода, является сложность поддержания на одном и том же абсолютном значении уровня жидкости в изделии, присоединенном к одной полости дифманометра, и уровня жидкости в эталонной емкости, присоединенной к другой полости дифманометра, для исключения влияния на показания дифманометра пьезометрического напора жидкости.

3.6.3.2 Разработка эталонной емкости и выбор ее геометрических размеров для дифференциального способа испытаний изделий жидкостью

Для повышения эффективности испытаний изделий на герметичность жидкостью предлагается способ испытаний изделий жидкостью с использованием дифференциальной схемы, эталонной и упругой емкостей и дифманометра. Схема устройства, реализующее этот способ, приведена на рисунке 3.50.



Рисунок 3.50 - Схема устройства испытаний изделий жидкостью с использованием эталонной и упругой емкостей и дифманометра

Устройство отличается от типовых, используемых, например, при испытаниях изделий пробным газом (по схеме, представленной на рисунке 3.43) тем, что при испытаниях изделий жидкостью все элементы устройства перед испытаниями заполняются пробной жидкостью. В эталонной емкости 1 размещена упругая емкость 11, заполненная предварительно газом до давления, которое немного меньше испытательного давления для конкретного испытываемого изделия.

При заполнении устройства испытаний изделий жидкостью и выравнивании давления во всех элементах устройства давление в эталонной емкости 1 будет равным давлению в изделии 3. Давление в упругой емкости 11 практически будет равным давлению в эталонной емкости 1.

Действительное давление в упругой емкости 11 будет несколько ниже давления в эталонной емкости, если учитывать упругие свойства сильфона. На точность испытаний изделий это различие в давлениях внутри упругой и эталонной емкостей не оказывает влияния.

На рисунке 3.51 приведены различные варианты исполнения эталонной емкости при испытаниях изделий на герметичность жидкостью с использованием дифманометра:

а) упругая емкость 2 заполнена газом и расположена в эталонной емкости 1;

б) упругая емкость 2 заполнена газом и расположена в отдельной камере 1, соединенной с эталонной емкостью;



Рисунок 3.51 - Схемы вариантов исполнения эталонной емкости при испытаниях изделий на герметичность жидкостью с использованием дифманометра

в) упругая емкость 2 заполнена газом под давлением, меньшим испытательного давления, и размещена совместно с грузами 4 в эталонной емкости 1;

г) упругая емкость 2 расположена в эталонной емкости 1 и давление в жидкости создается за счет действия массы грузов 3, расположенных над упругой емкостью.

Выбор объема упругой емкости при испытаниях изделий на герметичность жидкостью с использованием эталонной емкости и дифманометра рассматривается применительно к схеме, представленной на рисунке 3.50, и проводится по методике, аналогичной выбору объема эталонной емкости при испытаниях изделий на герметичность газом с использованием дифманометра в следующей последовательности:

- определяют изменение объема полости дифманометра  $\Delta V_{1\partial}$ , м<sup>3</sup>, по формуле (3.207) (равное, например, 1130,98 или 2826,00 мм<sup>3</sup>) или по другим формулам;

- по формуле (3.208) вычисляют уменьшенное значение давления в эталонной емкости и присоединенной к ней полости дифманометра *P*<sup>1</sup><sub>1</sub>, Па, при испытаниях изделий за счет изменения объема полости дифманометра;

- определяют или принимают допустимое (заданное) значение изменения давления в эталонной емкости и присоединенной полости дифманометра  $\Delta P_{1\partial}$  при испытаниях изделия;

- сопоставляют вычисленное значение снижение давления  $\Delta P_I = P_I - P_1^1$  в эталонной емкости с допустимым значением изменения давления в эталонной емкости и присоединенной полости дифманометра  $\Delta P_{I\partial}$  и устанавливают правильность выбора допустимого изменения давления в эталонной емкости;

- определяют необходимый объем упругой емкости, размещаемой в эталонной емкости или подключаемой к ней эталонной емкости  $V_{1\rm yff}$ , по формуле (3.211), которая принимает следующий вид

$$V_{1Y\Pi} > \Delta V_{1\partial} (P_{1Y\Pi} - \Delta P_{1\partial}) / \Delta P_{1\partial} , \qquad (3.223)$$

где  $P_{1\rm y\Pi}$  – давление газа в упругой емкости, которая устанавливается в эталонной емкости (заполненной жидкостью) или подключается к ней, и равное заданному давлению, при котором изделие испытывают на герметичность, Па.

Допустим, необходимо выбрать упругую емкость при испытаниях на герметичность изделий жидкостью типа автотракторных теплообменников при давлении 0,15 МПа с использованием дифманометра на перепад давлений, равный 250 Па.

Принимаем допустимое (заданное) значение изменения давления в эталонной емкости и присоединенной полости дифманометра  $\Delta P_{10}$ , равное ±5 Па.

Пункты методики выбора объема упругой емкости, предшествующие этому пункту, рассмотрены выше на примерах. Изменение объема полости выбранного дифманометра  $\Delta V_{10} = 11,30983 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$ , тогда  $V_{1У\Pi} > 11,30983 \cdot 10^{-7} \cdot (0,15 \cdot 10^6 - 5)/5 = 0,0339 \text{ м}^3$ .

Габаритные размеры такой цилиндрической упругой емкости составляют, например, длину, равную 0,4 м, и диаметр цилиндра – 0,328 м и вполне могут быть изготовлены и используемы в установках для испытаний изделий на герметичность.

Если провести аналогичные расчеты для железнодорожной цистерны, испытываемой при давлении, равном 6,5 МПа, с использованием дифманометра на перепад давлений, равный 400 Па, при допустимом значение изменения давления в эталонной емкости и присоединенной полости дифманометра  $\Delta P_{1\partial}$ , равном ± 8 Па, тогда получим при изменении объема полости выбранного дифманометра  $\Delta V_{1\partial} = 28,26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 V_{1У\Pi} > 28,26 \cdot 10^{-7} \cdot (6,5 \cdot 10^6 - 8)/8 = 2,296 \text{ м}^3$ .

Изготовить упругую емкость объемом 2,296 м<sup>3</sup> практически не представляется возможным. В этом случае необходимо в качестве эталонной емкости выбирать, например, устройство, представленное на рисунке 3.51г.

Таким образом, испытания изделий на герметичность жидкостью с использованием дифманометра, эталонной емкости и упругой емкости, заполняемой газом под давлением немного меньшим испытательного, применимы к изделиям, испытываемым при небольших давлениях, не превышающих 0,5 - 1,0 МПа, или при использовании упругой емкости, нагружаемой массой грузов.

На точность испытаний изделий по этому способу влияют уровни жидкости в изделии и эталонной емкости после разобщения полостей дифманометра при непосредственном контроле герметичности изделия. Разработана схема установки дифманометра при испытаниях изделий на герметичность жидкостью с использованием эталонной емкости, представленная на рисунке 3.52.

При установке дифманометра по этой схеме влияние уровня на его показания будут оказывать только отклонения в уровнях расположения вспомогательных сосудов 5, 8 и вентилей 6 и 7. Однако, эта погрешность является систематической и легко устраняется при настройке прибора на нулевое деление.



Рисунок 3.52 - Схема установки дифманометра при испытаниях изделий на герметичность жидкостью с использованием эталонной емкости

3.6.3.3 Испытания изделий на герметичность жидкостью с использованием эталонной емкости и дифманометра с возвратом его показаний в исходное положение

Испытания изделий на герметичность газом обычно проводятся с использованием сжатого воздуха при давлениях, не превышающих 0,6 МПа. Так как при испытаниях изделий газом с использованием дифманометра в качестве эталонной емкости используется обычная емкость, а не упругая как при испытаниях изделий жидкостью, поэтому проблемы испытаний изделий на газе упрощаются.

Однако, эталонные емкости и устанавливаемые в них упругие емкости больших объемов, используемые при испытаниях изделий жидкостью, становятся не удовлетворяющими условиям испытаний изделий не только из-за сложности изготовления, но потому, что увеличиваются погрешности измерений давлений от изменения температуры окружающей среды.

Для устранения рассмотренных выше недостатков при испытаниях изделий на герметичность жидкостью с использованием дифманометра, эталонной и упругой емкостей предложена другая методика проведения испытаний изделий. Основная сущность этой методики состоит в том, что в конце непосредственных испытаний изделия на герметичность или в процессе этих испытаний показания дифманометра возвращаются в исходное первоначальное положение или постоянно поддерживаются на первоначальном значении при испытаниях изделия.

Эта методика позволяет не только проводить испытания с меньшими погрешностями, но изменяет оценку герметичности из качественной по косвенному параметру – по падению давления, в количественную оценку герметичности по значениям утечек жидкости из испытываемого изделия.

На рисунке 3.53 приведена схема испытаний изделий жидкостью на герметичность с использованием эталонной емкости и дифманометра с возвратом его показаний в исходное положения. Испытания изделия 7 жидкостью проводится вначале по обычной методике. В конце испытаний с помощью микровинта 12 сжимают упругую емкость 11 и возвращают показания дифманометра 1 (с вторичным прибором, который на схеме не показан) в исходное отмеченное перед испытаниями положение. О герметичности изделия судят по объему жидкости, который вытесняется в изделие сильфоном 11 и определяется по перемещению микровинта 12.



Рисунок 3.53 - Схема испытаний изделий жидкостью на герметичность с использованием эталонной емкости и дифманометра с возвратом его показаний в исходное положение

Установим ориентировочно диапазон размеров сильфонов, необходимых для испытаний изделий на герметичность, например, от автотракторных теплообменников до железнодорожных цистерн. Если, например, железнодорожную цистерну объемом 40 м<sup>3</sup> испытывать с использованием эталонной емкости и дифманометра, который имеет перепад давлений 400 Па, с возвратом показаний в исходное положение, тогда в соответствии с формулой (3.222) получим, что  $\Delta V_2 = 40.400/2100 \cdot 10^6 = 7,62 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 = 7,62 \text{ см}^3$ .

Общий объем сильфона может составлять 15 - 20 см<sup>3</sup>, который будет сжиматься на 7 - 10 см<sup>3</sup> при испытаниях железнодорожных цистерн.

Выбираем, например, сильфон диаметром 30 мм, длиной 150 мм и с рабочим ходом, равным 75 мм, и микрометрический винт (используем обычный микрометр), в которого цена деления составляет ±0,01 мм. В этом случае объем, вытесняемый микрометрическим винтом, воздействующим на сильфон, при повороте микровинта на одно деление составляет  $V = \pi d^2 l / 4 = \pi \cdot 30^2 \cdot 0,01/4 = \pm7,07 \text{ мм}^3$ .

Значение  $\pm 7,07 \text{ мм}^3$  от общего объема сильфона, равного 7,62 см<sup>3</sup> = 7620 мм<sup>3</sup> составляет 0,009 %. Объем сильфона, равный 7,62 см<sup>3</sup> соответствует перепаду давлений 400 Па по дифманометру, то есть, 1 Па соответствует 7,62/400 = 0,01905 см<sup>3</sup> = 19,05 мм<sup>3</sup> или 19,05 мм<sup>3</sup>/7,07 мм<sup>3</sup> = 2,69 делений по микрометрическому винту.

Если выбрать сильфон диаметр, которого равен 20 мм, тогда  $V = \pi d^2 l/4 = \pi \cdot 20^2 \cdot 0.01/4 = \pm 3,14$  мм<sup>3</sup> и объем жидкости, равный 19,05 мм<sup>3</sup>/3,14 мм<sup>3</sup> составляет 6,07 делений при изменении перепада давлений по дифманометру на 1 Па. Таким образом, изделия с объемом более 20 – 100 м<sup>3</sup> можно испытывать жидкостью с использованием эталонной емкости и дифманометра с возвратом показаний в исходное положение с точностью  $\pm (3,5 - 10,0)$  мм<sup>3</sup> (на основании данных примеров  $\pm 3,14$  мм<sup>3</sup> и  $\pm 7,07$  мм<sup>3</sup>), что составляет  $\pm (0,2-0,5)$  Па.

Если испытывать изделие жидкостью с использованием эталонной емкости и дифманометра с перепадом давлений 400 Па, которое имеет объем 10 л = 0,01 м<sup>3</sup>, тогда  $\Delta V_2 = 0,01 \cdot 400/2100 \cdot 10^6 = 1,905 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 = 0,0019 \text{ см}^3 = 1,9 \text{ мм}^3$ , то есть, сильфоном трудно или не возможно измерить такое изменение объема.

В этих случаях необходимо предусмотреть специальный микровинт с емкостью, в которую этот микровинт вводится с помощью, например, резьбы с миллиметровым шагом с уплотнением по резьбе и дополнительным уплотнением. Допустим, что микровинт, который вытесняет жидкость из емкости, имеет диаметр, равный 3 мм. Объем, вытесняемый таким диаметром микровинта при перемещении на 0,01 мм равен 0,0707 мм<sup>3</sup> и составляет 3,72 % от 1,9 мм<sup>3</sup>. Если диаметр микровинта равен 2 мм, тогда вытесняемый объем при таком же перемещении равен 0,0314 мм<sup>3</sup> или составляет 1,68 %.

Эти расчеты указывают на возможность испытаний на герметичность жидкостью устройством с использованием эталонной емкости и дифманометром с возвратом его показаний в исходное положение изделий с объемом от 0,005 до 100 м<sup>3</sup>.

Если изделие герметично и никаких изменений в показаниях дифманометра нет, тогда необходимо предусмотреть в методике испытаний изменение показаний дифманометра в одну и другую стороны от первоначального положения в начале испытаний и в конце испытаний с помощью микровинта. Согласно ГОСТ 9544-93 [6] при испытаниях изделий водой по классу герметичности А, утечки воды не допускаются, но погрешность измерений не должна превышать  $\pm 0,01$  см<sup>3</sup>/мин =  $\pm 10$  мм<sup>3</sup>/мин, а использовав вышерассмотренное устройство можно измерять утечки с погрешностью  $\pm 0,0707$  мм<sup>3</sup>/мин. То есть, фактически всю трубопроводную арматуру по всем классам герметичности А, В, С и D можно испытывать жидкостью по рассмотренному способу.

### 3.7 Разработка и исследование устройств испытаний на герметичность изделий перегретым водяным паром

# 3.7.1 Устройство испытаний на герметичность изделий по наличию водяного пара в окружающем воздухе

Применение перегретого водяного пара обосновывается тем, что нагрев поверхности изделия до 120 - 140 <sup>0</sup>C не представляет обычно опасности для металлических соединений изделия, но способствует увеличению микрощелей, через которые проходит значительно большее количество пара, чем холодного воздуха. С другой стороны, плотность сжатого воздуха при давлении, например, 0,12 МПа составляет 1,29 кг/м<sup>3</sup> [62], а плотность водяного перегретого до температуры 150 <sup>0</sup>C пара составляет 0,5 кг/м<sup>3</sup> [62]. Если принять, что истечение перегретого пара и воздуха через микрощели ламинарное, тогда через одну и ту же микрощель расход пара в 2,58 раза больше, чем расход воздуха. Если принять истечение турбулентным (квадратичным), тогда расход перегретого пара в 1,6 раза будет больше, чем расход воздуха.

Контроль герметичности изделий при заполнении их перегретым паром может осуществляться устройством с использованием датчика обобщенного обнаружения следов водяного пара (рисунок 3.54) и устройством с использованием датчика локального обнаружения водяного пара в окружающем изделие воздухе (рисунок 3.55).

# 3.7.2 Исследование измерительного преобразователя водяного пара в окружающем изделие пространстве

Исследования по выбору измерительного преобразователя для обнаружения водяного пара в окружающем изделие воздухе проводились при подводе внутрь изделия перегретого водяного пара под давлением 0,12 МПа и температуре 115 - 120 <sup>0</sup>C.



Рисунок 3.54 - Схема устройства испытаний на герметичность изделий с использованием датчика обобщенного обнаружения водяного пара



Рисунок 3.55 - Схема устройства испытаний на герметичность изделий с использованием датчика локального обнаружения водяного пара

В качестве измерительного преобразователя использовались емкостные преобразователи, преобразователи переноса электрического заряда паром и преобразователи электропроводимости микропленки конденсата. Наиболее приемлемым оказался разработанный измерительный преобразователь, основанный на электропроводимости микропленки конденсата, схема которого приведена на рисунке 3.56.

Он состоит из двух электродов 2 и 3 из медной проволоки бифилярно уложенной на изолирующем каркасе 1. После укладки электродов на каркас удаляют изоляцию с поверхности электродов на 1/4-1/3 боковой поверхности измерительного преобразователя.

При воздействии водяного пара на поверхности измерительного преобразователя образуется микропленка. В виду большого числа бифилярно уложенных витков чувствительность измерительного преобразователя к появлению микропленки конденсата существенно увеличивается. После прекращения воздействия поступающего пара на измерительный преобразователь происходит быстрое испарение пленки конденсата с поверхности из-за большой поверхности преобразователя.



Рисунок 3.56 - Схема измерительного преобразователя электропроводимости микропленки конденсата Исследованиями установлено, что запаздывание на срабатывание такого измерительного преобразователя не превышает одной – двух секунд. Время удаления пленки конденсата зависит от ее толщины и изменяется от 2 - 3 с до нескольких минут, если на поверхности электродов оказывается микрокапли конденсата.

На рисунке 3.57 приведены результаты исследований влияния диаметра проводников измерительного преобразователя на формирование пленки конденсата от конденсации водяного пара, выходящего через микрощель изделия, и электропроводность пленки конденсата.

Исследования проводились с использованием проволоки диаметром 0,12; 0,25; 0,40 и 0,50 мм при постоянном давлении водяного пара внутри изделия, равном 0,12 МПа, и установке измерительного преобразователя над микрощелью на высоте 60 мм при постоянном расходе перегретого пара из микрощели изделия.

Исследованиями влияния диаметра проводников, используемых в качестве электродов измерительного преобразователя, установлено, что с уменьшением диаметра проводников чувствительность измерительного преобразователя возрастает.

Однако, использовать проводники, площадь поперечного сечения которых менее 0,25 мм<sup>2</sup>, нецелесообразно из-за уменьшения их разрывной прочности, что особенно проявляется при удалении изоляции с поверхности проводников в процессе изготовления измерительного преобразователя.



Рисунок 3.57 - Влияние диаметра проводников измерительного преобразователя на электропроводность пленки конденсата

## **3.7.3 Исследование чувствительности прибора обнаружения водяного** пара в воздухе, окружающем изделие

Экспериментально изготовить в изделии микрощели размерами около 25 - 150 мкм не представляется возможным. Методики измерения очень малых расходов водяного пара через такие микрощели не имеется. Поэтому исследование чувствительности прибора обнаружения водяного пара в воздухе, окружающем изделие, производились косвенным методом в следующей последовательности.

С помощью электрического нагревателя нагревалась пластина до такой температуры, чтобы время испарения одной капли воды, с поверхности этой пластины при опускании на нее капли воды, составляло 10, 20, 30, 40, 50 и 60 с. Объем одной капли воды определяется экспериментально с помощью измерительной стеклянной трубки на 2 см<sup>3</sup> с ценой деления 0,1 см<sup>3</sup> по ГОСТ 1770-74 [58] и принимается равным 24,0 мм<sup>3</sup>.

Масса одной капли воды, кг, определяется по формуле  $m = V_k \cdot \rho_{\mathcal{H}c} = 24,0\cdot998\cdot10^{-9} = 2,395\cdot10^{-5}$  кг, в которой  $V_k$  – объем капли воды, мм<sup>3</sup>;  $\rho_{\mathcal{H}c}$  - плотность воды,  $\rho_{\mathcal{H}c} = 998\cdot10^{-9}$  кг/мм<sup>3</sup>.

При испарении одной капли воды массой, равной 2,395·10<sup>-5</sup> кг образуется объем пара  $V_n = m/\rho_n = 2,395 \cdot 10^{-5}/0,768 = 31,2 \text{ см}^3$ , где  $\rho_n$ - плотность пара,  $\rho_n = 0,768 \text{ кг/m}^3$  [62].

На рисунке 3.58 приведены изменения показаний прибора обнаружения водяного пара в воздухе в зависимости от интенсивности расхода пара с поверхности нагретого тела при испарении одной капли воды с различной интенсивностью.

Из рисунка 3.58 видно, что расход водяного пара, равный 0,62 см<sup>3</sup>/с, фактически является минимально обнаруживаемым для прибора водяного пара. Минимально обнаруживаемые микрощели в изделии при испытаниях на герметичность с помощью перегретого пара, подводимого внутрь его полости, составляют около 50 мкм.



Рисунок 3.58 – Изменение показаний прибора обнаружения водяного пара в воздухе в зависимости от расхода пара при испарении капли воды

### 3.8 Разработка устройств испытаний на герметичность изделий с использованием излучателей света

Предложен способ испытаний на герметичность изделий цилиндрической формы, например, трубопроводов различных диаметров с использованием излучателей света [82].

На рисунке 3.59 изображено сечение круглого трубопровода с элементами четырехканального блока устройства испытаний на герметичность. Устройство, реализующее способ, содержит изделие 1 цилиндрической формы, импульсные излучатели 2, обойму 3, на которой закреплены импульсные излучатели, опоры 4 и обоймы с шарнирами 5 на концах, фотоприемники 6, внутри которых расположены фотоэлементы 7, ориентированные светочувствительной поверхностью к внутренней поверхности изделия. Фотоприемники соединены друг с другом и закреплены на шарнирах 8.



Рисунок 3.59 - Схема четырехканального блока устройства испытаний на герметичность изделий цилиндрической формы с использованием излучателей света

Экспериментальные исследования проводились на цилиндрическом трубопроводе диаметром 300 мм, сваренным из трех участков длиной по 400 мм и толщиной стенки 3 мм. Четыре импульсных излучателя 2, в качестве которых используют электронные фотовспышки «Саулуте» с длительностью световой вспышки 1/1250 с и с энергией вспышки 36 Дж, располагают по углам квадратного каркаса с длиной стороны 650 мм.

Каркас имеет возможность перемещаться вдоль трубопровода на четырех стойках 4, снабженных взаимодействующими с изделием шаровыми шарнирами 5.

Фотоприемники 6 выполнены в виде двух кругов диаметром 290 мм, соединенных друг с другом посредством двух взаимноперпендикулярных пластин шириной 100 мм с таким расчетом, чтобы образовалось четыре сектора по  $90^{0}$  каждый. В вершине каждого сектора закреплены светочувствительные элементы 7, например, фоторезисторы типа ФСК-1. Фотоприемники снабжены встроенными аналогичными опорными шаровыми шарнирами 8.

### 3.9 Разработка и исследование устройств дегазации пробной жидкости автоматизированных систем испытаний

Пробная жидкость, которая используется при испытаниях изделий на герметичность, не должна содержать растворенных газов или газов в виде пузырьков, которые существенно нарушают сплошность жидкости и оказывают влияние на точность контроля герметичности изделий. Разработаны конструкции устройств для дегазации пробной жидкости при испытаниях на герметичность изделий такие как поплавковый дегазатор жидкости и ультразвуковое устройство дегазации жидкости (акустический деаэратор) [83].

### 3.9.1 Акустический деаэратор

Акустический деаэратор может быть использован для деаэрации жидких сред, в частности для удаления из жидкости растворенного или находящегося в виде пузырьков газа [83]. Деаэратор (рисунок 3.60) содержит основание 1, к которому через эластичную прокладку 2 присоединена с помощью шпилек 3 пластина 4. На пластине посредствам эластичных элементов 5 установлены ультразвуковые преобразователи 6, выполняющие функции первичных акустических источников.

Над первичными акустическими источниками выполнена полость 7, с промежуточной жидкостью, ограниченная с боков основанием деаэратора, а сверху – вторичным акустическим источником 8, выполненным в виде пластины. Вторичный акустический источник установлен через акустически развязывающие эластичные прокладки 9. Над вторичным акустическим источником через эластичные прокладки установлено основание 10 деаэратора, на котором смонтирован корпус деаэратора, образованный стенкой 11 и наружной стенкой 12, между которыми помещен звукопоглотитель 13.

На основании корпуса деаэратора размещена платформа 14, на которой смонтированы своими основаниями цилиндроконические отводы 15 для активного вывода газов. Отвод в нижней части выполнен цилиндрическим. Цилиндрическая часть предназначена для фиксирования участка жидкости от полного объема жидкости в деаэраторе. Вторая часть элемента, предназначенная для сближения пузырьков, выполнена в виде обратного усеченного конуса. Далее идет цилиндрическая перфорированная часть, которая предназначена для интенсивного вывода пузырьков.

Цилиндрическая часть отводов по образующей снабжена отверстиями диаметром 3 – 5 мм, общая площадь которых составляет 30 – 50 % от общей цилиндрической поверхности. На платформе между отводами 15 выполнены отверстия 16 диаметром 5 – 10 мм, расположенные один за другим поперек платформы с промежутком 3 – 5 мм, а перед отверстиями выполнены перегородки 17, высотой 5 – 10 мм.



Рисунок 3.60 - Акустический деаэратор

Сверху на корпусе деаэратора установлена крышка 18, закрывающая рабочую емкость 19 деаэратора. В основании корпуса деаэратора выполнены отверстия 20 и 21 для подвода исходной и вывода деаэрированной жидкости.

### **3.9.2** Экспериментальные исследования дегазации жидкости под воздействием ультразвуковых колебаний

Общий вид экспериментальной установки ультразвуковой дегазации жидкости приведен на рисунке 3.61. Жидкость, содержащая газ в виде пузырьков, в данном случае вода, поступает в ультразвуковое устройство и выходит из него по трубопроводу диаметром 10 мм. Рабочая частота излучения ультразвуковых преобразователей составляет 18–22 кГц. На первичные акустические источники энергия поступает от генератора ультразвуковых колебаний AIRANGER DPL +. Выходная мощность генератора ультразвука 350 Вт, интенсивность излучения 0,32 Вт/см<sup>2</sup>.

При экспериментальных исследованиях определялось влияние времени нахождения жидкости в ультразвуковом устройство на количество остаточного (растворенного) газа в жидкости. При этом частота ультразвуковых колебаний и интенсивность оставались постоянными на протяжении всего эксперимента. Определение газосодержания в жидкости осуществлялось газожидкостным хроматографом типа РХ-5Н. Пределы измерения прибора составляют от 0 до 100 % общего процентного газосодержания. Погрешность прибора в диапазоне измерений составляет  $\pm 5$  %.



Рисунок 3.61 – Общий вид лабораторной ультразвуковой установки для дегазации пробной жидкости

На рисунке 3.62 приведен график зависимости остаточного газосодержания  $\Gamma_{c}$  воды от времени обработки *t*. Из этого графика видно, что интенсивное газовыделение из воды происходит в интервале времени до 30 с. Увеличение задержки жидкости в ультразвуковом устройстве больше 60 с, не оказывает существенного влияния на газовыделение из воды.



Рисунок 3.62 - Зависимость остаточного газосодержания воды от времени ее обработки ультразвуковыми колебаниями

### 4 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ И ПРОЦЕССОВ ИСПЫТАНИЙ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ КАК ОБЪЕКТОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

На основе анализа реально действующих на предприятиях систем испытаний изделий на герметичность пузырьковым, манометрическим и гидростатическим методами выделены пять основных типов устройств и технологических процессов, включая подготовительно - заключительные операции испытаний, как объектов автоматического управления.

Выделение типовых объектов автоматического управления проведено на основании того, что испытания изделий проводятся на газе (сжатом воздухе или перегретом паре) или жидкости и основными управляемыми параметрами являются давление газа или жидкости и уровень жидкости. Обычно на изменение уровня жидкости оказывает влияние давление газа и на давление газа оказывает влияние уровень жидкости. В объектах управления, работающих на водяном перегретом паре, на давление водяного пара в объекте оказывает влияние также температура пара и конденсата (воды).

Объекты автоматического управления, работающие на жидкости, фактически работают на газожидкостной смеси, поступающей в объект, которая представляет собой смесь газовой и жидкостной фаз в различном их сочетанием. Особенно это относится к жидкости, подаваемой гидронасосами или сжатым воздухом в объект автоматического управления или из объекта.

Для принятых типовых устройств разработаны математические модели:

- устройств, содержащих регулирующий клапан и пневматическую емкость;

- устройств, содержащих пневматическую емкость и клапаны на входе и выходе рабочей среды из емкости;

- газожидкостных устройств как объектов автоматического управления по давлению систем испытаний на герметичность изделий;

- газожидкостных устройств как объектов автоматического управления по уровню жидкости систем испытаний на герметичность изделий с учетом расходов газа и жидкости и с учетом расхода одной жидкости;

- изделий, испытываемых на герметичность перегретым водяным паром.

#### 4.1 Устройства, содержащие пневматическую емкость и регулирующий клапан на входе газа в емкость

Устройства, содержащие пневматическую емкость и регулирующий клапан, расположенный на входе газа в емкость, широко используются в системах испытаний на герметичность изделий. В качестве такой емкости в системах испытаний используются, например, эталонные емкости, изделия, испытываемые на герметичность.

Пневматическая емкость заполняется сжатым воздухом или другим пробным газом под избыточным давлением. Давление сжатого воздуха в такой

емкости обычно поддерживается постоянным или изменяется по заданной программе. На рисунке 4.1 приведена схема модели пневматических устройств, содержащих клапан 1 и пневматическую емкость 2. Клапан 1 представляет собой редукционное устройство, через которое дросселируется газ (сжатый воздух) от источника в емкость.



Рисунок 4.1 – Схема модели пневматических устройств, состоящих из емкости и регулирующего клапана на входе в емкость

Для машиностроительных приложений газовой динамики [69] при течении газов с достаточно большой скоростью через относительно короткие проточные части машин, какими являются запорные или регулирующие органы систем управления, теплообмен между газовыми частицами и частями машин не успевает осуществляться в заметной степени, поэтому газодинамические расчеты могут строиться на основе предположения об адиабатности процесса.

Течение газа через редукционное устройство может происходить с докритической или сверхкритической (дозвуковой или сверхзвуковой) скоростью и характеризуется коэффициентом  $\beta$  [69]. Для адиабатного процесса и двухатомных газов коэффициент адиабаты  $\kappa = 1,4$ , тогда коэффициент  $\beta$  определяется по формуле [69]  $\beta = [2/(\kappa + 1)]^{\kappa/(\kappa+1)} = 0,528$ . По значению коэффициента  $\beta$  определяют критическое давление [69]  $P_{\kappa p} = \beta P_1$ , где  $P_1$  - давление до редукционного клапана, Па;  $P_{\kappa p}$  - критическое давление после редукционного клапана изменяется в пределах  $0 < P < P_{\kappa p}$ , тогда скорость течения газа является докритической.

Для многих изделий, испытываемых на герметичность, сжатым воздухом, например, автотракторных теплообменников, топливных баков мобильной техники, испытательное давление не превышает 1,0 – 1,2 МПа. Критическое давление в этом случае составляет 0,53 – 0,64 МПа.

Из этого следует, если производится заполнение емкости от нулевого до заданного давления, то фактически до половинного значения давления в емкости от заданного значения расход газа через редукционный клапан происходит со сверхкритической скоростью, а вторая половина давления в емкости поднимается при докритическом течении газа.

Если же в емкости регулируется какое-либо давление с помощью системы автоматического управления и рассматриваемого редукционного клапана, тогда течение газа через этот клапан будет происходить с докритической скоростью. При заполнении емкости газом, применительно к системам испытаний на герметичность изделий, определяется обычно время, за которое давление в емкости поднимается до заданного значения. Отсюда следует целесообразность принятия докритической скорости течения газа через редукционный клапан при заполнении емкости.

Уравнение динамики газа в емкости с редукционным клапаном (рисунок 4.1) может быть представлено в следующем виде

$$V d\rho/dt = G_1, \tag{4.1}$$

где V- объем газа в емкости,  $M^3$ ;

 $\rho$  - плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;

*t* - время, с;

 $G_{l}$  – массовый расход газа, кг/с, в емкость через редукционный клапан.

Для газообразных сред используют уравнение состояния [69]

$$P/\rho = RT, \qquad (4.2)$$

где P - давление газообразной среды, Па; R - газовая постоянная, м<sup>2</sup>·c<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>;

*Т* - абсолютная температура среды, К.

Дифференцируя уравнение (4.2) по P и  $\rho$ ,

$$dP = RTd\rho \tag{4.3}$$

и, подставив в уравнение (4.1), получим  $\frac{V}{RT}\frac{dP}{dt} = G_1$ .

 $\frac{V}{2T}\frac{dP}{dt} = G_1. \tag{4.4}$ 

Скорость течения газа через редукционный клапан 1 (рисунок 4.1) докритическая. Для докритического течения газа массовый расход [77] определяется по формуле

$$G_{1} = \mu_{1} F_{1} \sqrt{\frac{2 k}{k - 1} \frac{P_{1} P}{RT}} \left[ \left( \frac{P}{P_{1}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P}{P_{1}} \right)^{\frac{k + 1}{k}} \right], \quad (4.5)$$

где  $\mu_l$ , *к* - коэффициент расхода и коэффициент адиабаты;

 $P_1$ , P,  $F_1$  - давление газа, Па, до и после редукционного клапана и площадь его проходного сечения, м<sup>2</sup>;

Уравнение (4.5) может быть приведено к виду [77]

$$G_1 = \mu_1 F_1 K_a \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P)}{RT}},$$
(4.6)

где Ка - коэффициент, определяемый по формуле
$$K_a = \sqrt{\kappa \left[ 2/(\kappa+1) \right]^{(\kappa+1)/(\kappa-1)}}.$$
(4.7)

Уравнение (4.4) с учетом выражения (4.6) принимает вид

$$\frac{V}{RT}\frac{dP}{dt} = \mu_1 K_a F_1 \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P)}{RT}}.$$
(4.8)

Уравнение (4.8) необходимо линеаризовать. Переменными величинами в нем являются *F*<sub>1</sub>, *P*<sub>1</sub>, и *P*. Установившиеся значения переменных величин:

$$F_1 \to F_{10}; \quad P_1 \to P_{10}; \quad P \to P_0. \tag{4.9}$$

Координаты переменных величин, выраженные через приращения и установившиеся значения, имеют вид:

$$F_{1} = F_{10} + \Delta F_{1}; \quad P_{1} = P_{10} + \Delta P_{1}; \quad P = P_{0} + \Delta P.$$
(4.10)

После линеаризации (4.8) получим

$$\frac{V}{RT}\frac{dP}{dt} = \mu_1 K_a F_{10} \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} + \mu_1 K_a \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} \Delta F_1 + \mu_1 K_a F_{10} \frac{(2P_{10} - P_0)}{2\sqrt{RT}\sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}}} \Delta P_1 - \mu_1 K_a F_{10} \frac{P_{10}}{2\sqrt{RTP_{10}(P_{10} - P_0)}} \Delta P . \quad (4.11)$$

Для установившегося течения газа уравнение (4.8) при значениях соотношений (4.9) принимает вид

$$\frac{V}{RT}\frac{dP_0}{dt} = \mu_1 K_a F_{10} \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} = 0.$$
(4.12)

Из выражения (4.12) установившийся расход газа через клапан

$$G_0 = \mu_1 K_a F_{10} \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}}.$$
(4.13)

Вычитая из (4.11) (4.12), и разделив обе части полученного выражения на установившийся расход G<sub>0</sub>, получим

$$\frac{V \cdot P_0}{G_0 RT} \frac{d(\Delta P/P_0)}{dt} + \frac{2P_{10} - P_0}{2(P_{10} - P_0)} \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} + \frac{(2P_{10} - P_0)}{2(P_{10} - P_0)} \frac{\Delta P_1}{P_{10}}.$$
(4.14)

Введем обозначения:

$$\frac{VP_0}{G_0RT} = T_1; \qquad \frac{\Delta P}{P_0} = x(t); \qquad \frac{\Delta F_1}{F_{10}} = a(t); \qquad \frac{\Delta P_1}{P_{10}} = c(t),$$
$$\frac{2P_{10} - P_0}{2(P_{10} - P_0)} = k_1; \qquad \frac{2P_{10} - P_0}{2(P_{10} - P_0)} = k_2.$$
(4.15)

С учетом выражений (4.15) уравнение (4.14) принимает вид

$$T_1 \cdot dx / dt + k_1 x(t) = a(t) + k_2 c(t).$$
(4.16)

После преобразования по Лапласу, получим

$$(T_1s + k_1) \cdot x(s) = a(s) + k_2 c(s), \qquad (4.17)$$

где s-оператор Лапласа.

На рисунке 4.2 представлена структурная схема устройства, содержащего регулирующий клапан и пневматическую емкость, составленная по уравнению (4.17), по которой по каждому входному сигналу можно определить передаточную функцию. Эти передаточные функции имеют следующий вид.



Рисунок 4.2 – Структурная схема устройства, содержащего регулирующий клапан и пневматическую емкость

По изменению проходного сечения *F*<sub>1</sub> входного регулирующего клапана устройства, содержащего регулирующий клапан и пневматическую емкость,

$$W_{F1}(s) = \frac{x(s)}{a(s)} = \frac{1}{T_1 s + k_1}.$$
(4.18)

По изменению давления  $P_1$  перед регулирующим клапаном устройства, содержащего регулирующий клапан и пневматическую емкость,

$$W_c(s) = \frac{x(s)}{c(s)} = \frac{k_2}{T_1 s + k_1}.$$
(4.19)

Дифференциальное уравнение (4.16) и передаточные функции позволяют провести анализ влияния различных параметров устройства, содержащего регулирующий клапан и пневматическую емкость, на постоянную времени  $T_1$  и коэффициенты  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$ .

# 4.2 Устройства, содержащие пневматическую емкость и клапаны на входе и выходе газа из емкости

Устройства, содержащие пневматическую емкость и клапаны, расположенные на входе и выходе газа из емкости широко используются в промышленных объектах и системах испытаний на герметичность изделий. На рисунке 4.3 приведена схема пневматических устройств, содержащих пневматическую емкость 2 и клапаны 1 и 3, расположенные на входе и выходе газа из емкости.



Рисунок 4.3 – Схема пневматических устройств, состоящих из емкости и клапанов, расположенных на входе и выходе газа из емкости, систем испытаний на герметичность

Уравнение динамики устройства, состоящего из емкости и клапанов, расположенных на входе и выходе сжатого воздуха из емкости, (рисунок 4.3) может быть представлено аналогично уравнению (4.1) в следующем виде:

$$V \cdot d\rho/dt = G_1 - G_2, \tag{4.20}$$

где  $G_1$  и  $G_2$  – массовый расход газа в емкость 2 и из этой емкости, кг/с.

Для газообразных сред используют уравнение (4.2)  $P/\rho = RT$ . Дифференцируя его по P и  $\rho$ , получим  $dP = RTd\rho$ . С учетом этого выражения (4.20) принимает вид

$$\frac{V}{RT}\frac{dP}{dt} = G_1 - G_2. \tag{4.21}$$

Скорость течения газа через клапаны 1 и 3 (рисунок 4.3) докритические. Для докритического течения газа массовые расходы через клапаны  $G_1$  и  $G_2$  определяется аналогично формуле (4.6), а именно:

$$G_{1} = \mu_{1} F_{1} K_{a} \sqrt{\frac{P_{1}(P_{1} - P)}{RT}}, \qquad (4.22)$$

$$G_2 = \mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P(P - P_2)}{RT}},$$
 (4.23)

где  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  - коэффициент расхода входного и выходного регулирующих клапанов;

 $F_1, F_2$ - площадь проходного сечения входного и выходного регулирующих клапанов, м<sup>2</sup>;

К<sub>а</sub> - коэффициент, определяемый по формуле (4.7);

*P*<sub>1</sub>, *P*, *P*<sub>2</sub> - давление сжатого воздуха до клапана 1, в емкости 2 и после клапана 3, Па.

Уравнение (4.21) с учетом выражений (4.22) и (4.23) принимает вид

$$\frac{V}{RT}\frac{dP}{dt} = \mu_1 K_a F_1 \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P)}{RT}} - \mu_2 K_a F_2 \sqrt{\frac{P(P - P_2)}{RT}}.$$
 (4.24)

Уравнение (4.24) нелинейное и его необходимо линеаризовать. Переменными величинами в нем являются  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $P_1$ , P и  $P_2$ . Установившиеся значения этих переменных величин обозначаем:

$$F_1 \rightarrow F_{10}; F_2 \rightarrow F_{20}; P_1 \rightarrow P_{10}; P \rightarrow P_0; P_2 \rightarrow P_{20}.$$
 (4.25)

Координаты переменных величин, выраженные через приращения и установившиеся значения имеют вид:

$$F_1 = F_{10} + \Delta F_1; F_2 = F_{20} + \Delta F_2; P_1 = P_{10} + \Delta P_1; P = P_0 + \Delta P; P_2 = P_{20} + \Delta P_2.$$
(4.26)

Разложив выражение (4.24) в ряд Тейлора, пренебрегая членами второго и выше порядков малости, получим

$$\frac{V}{RT}\frac{dP}{dt} = \mu_1 K_a F_{10} \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} + \mu_1 K_a \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} \Delta F_1 + \mu_1 K_a F_{10} \frac{(2P_{10} - P_0)}{2RT \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}}} \Delta P_1 - \frac{1}{2RT} \frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT} \Delta F_1 + \frac{1}{2RT} \frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT} \Delta P_1 - \frac{1}{2RT} \frac$$

$$-\mu_1 K_a F_{10} \frac{P_{10}}{2\sqrt{RTP_{10}(P_{10}-P_0)}} \Delta P - \mu_2 K_a F_{20} \sqrt{\frac{P_0(P_0-P_{20})}{RT}} - \mu_2 K_a \sqrt{\frac{P_0(P_0-P_{20})}{RT}} \Delta F_2 - \mu_2 K_a \sqrt{\frac$$

$$-\mu_2 K_a F_{20} \frac{(2P_0 - P_{20})}{2\sqrt{RTP_0(P_0 - P_{20})}} \Delta P + \mu_2 K_a F_{20} \frac{P_{20}}{2\sqrt{RTP_0(P_0 - P_{20})}} \Delta P_2.$$
(4.27)

Для установившегося течения газа уравнение (4.24), при значениях соотношений (4.25), принимает вид

$$\frac{V}{RT}\frac{dP_0}{dt} = \mu_1 K_a F_{10} \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} - \mu_2 K_a F_{20} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} = 0.$$
(4.28)

Из уравнения (4.28) определяется установившийся расход газа через оба клапаны устройства

$$G_0 = \mu_1 K_a F_{10} \sqrt{\frac{P_{10}(P_{10} - P_0)}{RT}} = \mu_2 K_a F_{20} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}}.$$
 (4.29)

Вычитая из (4.27) (4.28), и разделив обе части полученного выражения на установившийся расход  $G_0$ , получим

$$\frac{V \cdot P_0}{G_0 RT} \frac{d(\Delta P/P_0)}{dt} + \frac{P_{10}(2P_0 - P_{20}) - P_0^2}{2(P_{10} - P_0)(P_0 - P_{20})} \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} + \frac{(2P_{10} - P_0)}{2(P_{10} - P_0)} \frac{\Delta P_1}{P_{10}} + \frac{P_{20}^2}{2P_0(P_0 - P_{20})} \frac{\Delta P_2}{P_{20}}.$$
(4.30)

Введем обозначения:

$$\frac{VP_0}{G_0RT} = T_a; \frac{\Delta P}{P_0} = x(t); \frac{\Delta F_1}{F_{10}} = a(t); \frac{\Delta F_2}{F_{20}} = b(t); \frac{\Delta P_1}{P_{10}} = c(t); \frac{\Delta P_2}{P_{20}} = d(t);$$
$$\frac{P_{10}(2P_0 - P_{20}) - P_0^2}{2(P_{10} - P_0)(P_0 - P_{20})} = k_1; \frac{(2P_{10} - P_0)}{2(P_{10} - P_0)} = k_2; \frac{P_{20}^2}{2P_0(P_0 - P_{20})} = k_3.$$
(4.31)

С учетом выражений (4.31) уравнение (4.30) принимает вид

$$T_a \cdot dx/dt + k_1 x(t) = a(t) - b(t) + k_2 c(t) + k_3 d(t)$$
(4.32)

или после преобразования по Лапласу

$$(T_a s + k_1) \cdot x(s) = a(s) - b(s) + k_2 c(s) + k_3 d(s).$$
(4.33)

На рисунке 4.4 представлена структурная схема устройства, содержащего пневматическую емкость и клапаны, расположенные на входе и выходе газа из емкости, по уравнению (4.33).



Рисунок 4.4 – Структурная схема устройства, содержащего пневматическую емкость и клапаны, расположенные на входе и выходе газа из емкости

По структурной схеме по каждому входному сигналу можно определить передаточную функцию. По изменению проходного сечения *F*<sub>1</sub> входного клапана передаточная функция

$$W_{F1}(s) = \frac{x(s)}{a(s)} = \frac{1}{T_a s + k_1}.$$
(4.34)

По изменению проходного сечения выходного клапана передаточная функция

$$W_{F2}(s) = \frac{x(s)}{b(s)} = -\frac{1}{T_a s + k_1}.$$
(4.35)

По изменению входного давления газа  $P_1$  в устройство передаточная функция

$$W_{P1}(s) = \frac{x(s)}{c(s)} = \frac{k_2}{T_a s + k_1}.$$
(4.36)

По изменению выходного давления газа после выходного клапана устройства передаточная функция

$$W_{P2}(s) = \frac{x(s)}{d(s)} = \frac{k_3}{T_a s + k_1}.$$
(4.37)

Полученное дифференциальное уравнение и передаточные функции позволяют провести анализ влияния различных параметров устройства, содержащего пневматическую емкость и клапаны, расположенные на входе и выходе газа из емкости, на постоянную времени  $T_a$  и коэффициенты  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$  и  $\kappa_3$ .

### 4.3 Математическое моделирование газожидкостных устройств испытаний на герметичность изделий как объектов автоматического управления по давлению газа

Изделия на герметичность испытывают не только газом, но и жидкостью, например, железнодорожные цистерны испытывают на герметичность водой. Вода в цистерну и дополнительные гидравлические камеры подается из подземных емкостей гидронасосами или сжатым воздухом.

Технологические процессы, которые происходят при заполнении цистерны водой, при испытаниях ее на герметичность и при сливе воды в подземные емкости формируют газожидкостную или жидкостногазовую среду с различным содержанием газообразной фазы в жидкостной. Процессы насыщения жидкости газообразной фазой происходят также при ее дросселировании через сужающие устройства, в которых происходит нагрев жидкости в микрообъемах и испарение жидкости.

Рассматривая газожидкостные устройства систем испытаний на герметичность изделий с точки зрения динамики процессов, можно прийти к выводу, что необходимо провести:

- математическое моделирование динамики газожидкостного устройства как объекта автоматического управления по давлению газа систем испытаний и

- математическое моделирование динамики газожидкостного устройства как объекта автоматического управления по уровню жидкости систем испытаний на герметичность изделий.

На рисунке 4.5 приведена схема газожидкостного устройства как объекта автоматического управления по давлению газа систем испытаний на герметичность изделий. Она содержит трубопровод 1 подвода среды через клапан 2 в емкость 3.



Рисунок 4.5 – Схема газожидкостного устройства как объекта автоматического управления по давлению газа систем испытаний на герметичность изделий В теоретических выкладках, рассматриваемых ниже, принимается, что по трубопроводу 1 поступает газожидкостная смесь. Это позволяет рассматривать различные варианты прохождения по трубопроводу 1 как жидкости, так и газожидкостной смеси с заданными соотношениями газовой и жидкостной фаз.

В нижней части емкости 3 находится жидкость 4, а верхняя часть 5 емкости заполнена газом. По трубопроводам 6, 8 и через клапан 7 отводится из емкости газ, а через клапан 9 и трубопровод 10 отводится из емкости 3 жидкость.

Как отмечалось выше, течение газа через регулирующие клапаны может происходить с докритической или сверхкритической скоростью. Для рассматриваемых в работе газожидкостных устройств течение газа через регулирующий клапан, отводящий газ из емкости устройства, зависит от давления газа после регулирующего клапана. Так как после регулирующего клапана 7 в газожидкостных устройствах отсутствуют устройства подъема давления газа для его перемещения, а течение газа в трубопроводе после регулирующего клапана происходит от давления газа в емкости, тогда необходимо принимать течение газа через клапан 7 докритическим.

Динамика газожидкостных устройств систем испытаний на герметичность изделий как объектов автоматического управления по давлению газа рассматривается с учетом притока и отвода жидкости и газа из установок, как и для промышленных газожидкостных установок, например, сепарационных установок нефтегазовых смесей. На давление газа в емкости газожидкостного устройства в этих случаях существенное влияние оказывает изменение уровня жидкости.

Поэтому ниже рассматривается вывод уравнения динамики газожидкостных устройств систем испытаний на герметичность изделий как объектов автоматического управления по давлению газа в емкости с учетом изменения уровня жидкости в этой емкости. После этого рассматривается вывод уравнения динамики газожидкостных устройств систем испытаний на герметичность изделий как объектов автоматического управления по уровню жидкости в емкости с учетом изменения давления газа в этой емкости.

Состояние газа, находящегося в емкости газожидкостного устройства, описывается уравнением состояния газа

$$PV_2 = mRT, \qquad (4.38)$$

где Р – давление газа в емкости газожидкостного устройства, Па;

 $V_2$  – объем газового пространства в емкости, м<sup>3</sup>;

*m* – масса газа в емкости устройства, кг;

R – газовая постоянная, м<sup>2</sup>·c<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>;

Т – абсолютная температура газа, К.

На основании принятых допущений переменными величинами в уравнении (4.38) являются давление P, объем  $V_c$  и масса m. Поэтому, дифференцируя уравнение (4.38) по принятым переменным по времени t, получим

$$P\frac{dV_{e}}{dt} + V_{e}\frac{dP}{dt} = \frac{dm}{dt}RT$$
(4.39)

или 
$$\frac{P}{RT}\frac{dV_{e}}{dt} + \frac{V_{e}}{RT}\frac{dP}{dt} = \frac{dm}{dt}.$$
 (4.40)

Выражение (4.40) является уравнением динамики газожидкостного устройства, представленного на рисунке 4.5, и может быть записано в виде

$$\frac{P}{RT}\frac{dV_{z}}{dt} + \frac{V_{z}}{RT}\frac{dP}{dt} = G_{1} - G_{2} - G_{3}, \qquad (4.41)$$

где  $G_I$  – массовый расход газожидкостной смеси  $G_{cM}$  воды и газа, поступающих в емкость, кг/с;

 $G_2$ ,  $G_3$  – массовые расходы газа и воды, выходящих из емкости, кг/с.

Массовый расход  $G_1 = G_{cM}$  характеризуется определенными свойствами. Например, для парожидкостных смесей [84] обычно выделяют четыре режима течения: пузырьковое течение, снарядное, пенное и пленочное течения.

При пузырьковом режиме течения газовая фаза распределена в жидкости в виде отдельных пузырьков, размеры которых существенно меньше характерного размера аппарата, например, диаметра проходной части клапана или трубопровода.

Снарядный режим течения газожидкостной смеси характеризуется периодическим прохождением вдоль оси трубопровода больших пузырей (газовых включений). Диаметры таких пузырей сравнимы с диаметром трубопровода. Пузыри газа следуют на некотором расстоянии друг от друга, а пространство между ними заполнено жидкостью. Структура снарядного течения является неустойчивой и при незначительном повышении газосодержания появляется пена. Такой режим течения называется пенным течением.

Пленочное течение характеризуется наличием отчетливо выраженного разделения течения жидкостной и газовой фаз. Это разделение зависит от ориентации трубопровода. При вертикальном расположении трубопровода, например, может появится течение жидкостной фазы вдоль стенок трубопровода, а газовой фазы – в центре жидкостной фазы газожидкостной смеси.

В настоящее время не существует методов, позволяющих осуществить точный расчет двухфазных газожидкостных течений [84]. Обычно при теоретическом описании двухфазных течений газожидкостных систем используют два подхода: феноменологический и статистический.

В рамках феноменологического подхода выделяют [84]: аналитические методы, к которым относятся модели гомогенного и раздельного течений, интегральный и дифференциальный анализы течений. В гомогенной модели смесь компонентов принимается псевдонепрерывной средой с усредненными свойствами, то есть, газожидкостная смесь рассматривается как однородная жидкость, к которой применены обычные законы гидродинамики. Принимается, что газ и жидкость перемещаются с одинаковой скоростью и структура потоков не рассматривается [84].

Для работы газожидкостных устройств систем испытаний на герметичность характерным является пузырьковый режим течения газожидкостной смеси и принимается гомогенная модель течения газожидкостного потока.

Допустим (рисунок 4.5), что по трубопроводу 1 с площадью поперечного сечения  $F_1$ ,  $M^2$ , протекает газожидкостная смесь с массовым расходом  $G_1 = G_{CM}$ , кг/с, причем

$$G_{\mathcal{CM}} = G_{\mathcal{H}} + G_{\mathcal{P}}, \qquad (4.42)$$

где  $G_{\mathcal{H}}$ ;  $G_{\mathcal{I}}$  - массовый расход жидкости и газа в газожидкостной смеси, кг/с.

Обычно вводят обозначение [84]

$$x = G_{z}/G_{cM}, \qquad (4.43)$$

где *x* – массовое расходное удельное газосодержание в газожидкостной смеси.

Разделив обе части уравнения (4.42) на  $G_{cm}$  и подставив соотношение (4.43), получим

$$(1-x) = G_{\mathcal{H}}/G_{CM},$$
 (4.44)

где (1-x) – массовое расходное удельное содержание жидкости в газожидкостной смеси.

Согласно модели гомогенного течения принимается, что газ и жидкость движутся с одинаковой скоростью, равной приведенной скорости. При этом удельный объем смеси складывается аддитивно из удельных объемов фаз [84], то есть,

$$\nu_{cM} = \frac{1}{\rho_{cM}} = x \nu_{e} + (1 - x) \nu_{cM} = \frac{x}{\rho_{e}} + \frac{1 - x}{\rho_{cM}}, \qquad (4.45)$$

где  $\upsilon_{CM}$ ,  $\upsilon_{2}$ ,  $\upsilon_{\mathcal{H}}$  - удельный объем газожидкостной смеси, газовой и жидкостной фаз этой смеси, м<sup>3</sup>/кг;

 $\rho_{e}, \rho_{\mathcal{H}}$  – плотность газовой и жидкостной фаз газожидкостной смеси, кг/м<sup>3</sup>.

Скорость движения газожидкостной смеси  $u_{cm}$ , м/с, можно определить по соотношению [84]

$$u_{cM} = G_{cM} / F_1^{'} \rho_{cM} , \qquad (4.46)$$

где  $F_1'$  - площадь сечения трубопровода, по которой проходит газожидкостная смесь, м<sup>2</sup>.

Из формул (4.45) и (4.46) получим

$$u_{CM} = \frac{G_{CM}}{F_1} \left( \frac{x}{\rho_2} + \frac{1-x}{\rho_{\mathcal{H}}} \right).$$
(4.47)

Для определения массового расхода газожидкостной смеси через клапан 2 (рисунок 4.5), учитывая принятую модель гомогенного течения, используем формулу течения обычной жидкости через клапаны [61]

$$G = \mu_1 F_1 \sqrt{2\rho(P_1 - P)} \,. \tag{4.48}$$

Подставив в эту формулу вместо G расход газожидкостной смеси  $G_{cm}$  и вместо плотности жидкости  $\rho$  плотность газожидкостной смеси, получим

$$G_{cM} = \mu_1 F_1 \sqrt{2\rho_{cM}(P_1 - P)} , \qquad (4.49)$$

где  $\mu_l$  - коэффициент расхода газожидкостной смеси через клапан;

 $F_{1}$  - площадь проходного сечения клапана, м<sup>2</sup>;

 $P_{l}$ , P – давление, Па, газожидкостной смеси до и после клапана.

Подставив в формулу (4.49) значения  $\rho_{\scriptscriptstyle CM}$  из формулы (4.45), получим, что

$$G_{cM} = \mu_1 F_1 \sqrt{\frac{2(P_1 - P)}{\left[\frac{x}{\rho_e} + \frac{(1 - x)}{\rho_{cK}}\right]}}.$$
 (4.50)

С учетом формул (4.43) и (4.44) формула (4.50) принимает вид

$$G_{cM} = \mu_1 F_1 \sqrt{\frac{2(P_1 - P)}{\left[G_2 / G_{cM} \rho_2 + G_{cM} / G_{cM} \rho_{cM}\right]}}$$
(4.51)

$$G_{cM} = \frac{2\mu_1^2 F_1^2 (P_1 - P)}{G_{e} / \rho_{e} + G_{\mathcal{H}} / \rho_{\mathcal{H}}}$$

(4.52)

Формулы (4.50) – (4.52) показывают, что при относительном увеличении газовой фазы в газожидкостном потоке его расход через регулирующий клапан уменьшается. Такие же положения вытекают, например, если рассматривать течение фаз газожидкостной смеси с учетом скорости звука. При увеличении газовой фазы в газожидкостном потоке скорость звука в двухфазной среде (на-

пример, вода – сжатый воздух) снижается (скорость звука в воде в несколько раз больше скорости звука в воздухе при рассматриваемом давлении), гидравлическое сопротивление клапана увеличивается и расход среды через него уменьшается.

Массовый расход газа через регулирующий клапан 7 (рисунок 4.5)  $G_2$ , кг/с, при докритическом течении газа, определяется по формуле (4.6), которая принимает следующий вид

$$G_2 = \mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P(P - P_2)}{RT}}, \qquad (4.53)$$

где  $\mu_2$  - коэффициент расхода газа через регулирующий клапан, установленный на трубопроводе отвода газа из емкости;

 $F_2$  – площадь проходного сечения регулирующего клапана расхода газа из емкости, м<sup>2</sup>;

*P*, *P*<sub>2</sub> – давление газа в емкости устройства и после регулирующего клапана расхода газа, Па;

Массовый расход воды  $G_3$ , кг/с, через клапан 9 (рисунок 4.5) определяются по формуле идентичной формуле (4.48)

$$G_3 = \mu_3 F_3 \sqrt{2 \rho_{\theta} (P - P_3)}; \qquad (4.54)$$

где  $\mu_3$  - коэффициент расхода воды для клапана 9;

 $F_3$  - площадь проходного сечения клапана отвода воды из емкости устройства, м<sup>2</sup>;

*P*, *P*<sub>3</sub> - давление газожидкостной смеси в емкости устройства и в трубопроводе отвода воды после регулирующего клапана, Па;

 $\rho_{e}$  - плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

Преобразуем выражение  $\frac{P}{RT} \frac{dV_{z}}{dt}$  в уравнении (4.40) через уровень жид-

кости в емкости газожидкостного устройства потому, что при изменении уровня жидкости изменяется объем пространства, занимаемого газом в емкости.

Если провести плоскость перпендикулярно оси емкости газожидкостного устройства, тогда получим в сечении окружность. На рисунке 4.6а представлена окружность и оси координат. Центр окружности обозначен буквой C с координатами a и e, C(a, e).

Если на окружности взять точку M(x, y), тогда прямая CM будет представлять радиус окружности и определяется по уравнению, записанному по координатам двух точек

$$CM = R_1 = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}$$
 (4.55)

Расположим оси координат на вертикальном диаметре с началом координат в нижней части окружности, как показано на рисунке 4.66. Уравнение

(4.55) принимает в этом случае следующий вид



$$CM = R_1 = \sqrt{x^2 + (y - b)^2}$$
 (4.56)

Уровень жидкости в емкости устройства обозначен через H, а отрезок  $NM = x_1$ . Отрезок  $NC = H - OC = H - R_1$ . Определяем, что

$$x_{1} = \sqrt{R_{1}^{2} - (H - R_{1})^{2}} = \sqrt{R_{1}^{2} - H^{2} + 2HR_{1} - R_{1}^{2}} = \sqrt{2HR_{1} - H^{2}}.$$
 (4.57)

Многие промышленные емкости, заполняемые газом или жидкостью, в том числе и емкости газожидкостных систем испытаний на герметичность изделий, например, железнодорожные цистерны, проверяемые на герметичность, или подземные емкости для накопления воды при испытании этих же цистерн, имеют форму цилиндра, расположенного горизонтально.

Площадь поверхности жидкости в такой емкости газожидкостного устройства s,  $m^2$ , определяется с учетом формулы (4.57) по следующему соотношению

$$s = 2x_1 L = 2L\sqrt{2HR_1 - H^2}, \qquad (4.58)$$

где *L* - длина емкости газожидкостного устройства, м. Изменение объема жидкости в емкости от изменения уровня

$$\Delta V_{\mathcal{H}} = s\Delta H = 2L\sqrt{2HR_1 - H^2}\Delta H \tag{4.59}$$

или в дифференциальной форме, разделив обе части уравнения (4.59) на *dt*, получим

$$dV_{\mathcal{H}}/dt = 2L\sqrt{2HR_1 - H^2} \cdot dH/dt.$$
(4.60)

Однако, уравнения (4.59) и (4.60) требуют дополнительного рассмотрения в том смысле, что изменение объема жидкости в цилиндрической емкости зависит не только от изменения уровня H, но и от изменения площади s жидкости, то есть первая часть уравнения (4.59) может быть записана в следующем виде  $\Delta V_{\mathcal{H}} = \Delta (sH)$ .

Теоретически сложно по этому выражению доказать о несущественном влиянии кривизны емкости (по диаметру) на изменение площади *s* и объема  $\Delta V_{\mathcal{H}}$  по сравнению с влиянием уровня *H* на изменение объема жидкости  $\Delta V_{\mathcal{H}}$ , то есть, доказать о правомочности использования в дальнейших выкладках формулы (4.59).

Однако, расчетами установлено, что для емкости длиной L = 10 м,  $R_1 = 1$  м и изменении уровня жидкости  $\Delta H = 0,01$  м изменения объема жидкости в емкости, определенное по выражению (4.59)  $\Delta V_1 = 0,1732$  м<sup>3</sup>. Если же учитывать влияние кривизны изделия по радиусу  $R_1 = 1$  м выделенного участка уровня жидкости высотой  $\Delta H$ , тогда  $\Delta V_3 = 0,1726$  м<sup>3</sup>. Различие в определении значения  $\Delta V_1$  по отношению к  $\Delta V_3$  составляет 0,35 %.

Увеличение уровня и объема жидкости в емкости газожидкостного устройства приводит к уменьшению объема  $dV_2$ , занимаемого газом, поэтому

$$\frac{dV_{\mathcal{H}}}{dt} = -\frac{dV_{\mathcal{H}}}{dt} \tag{4.61}$$

или

$$dV_{e}/dt = -2L\sqrt{2HR_{1} - H^{2}} \cdot dH/dt$$
. (4.62)

После подстановки выражений (4.50), (4.53), (4.54) и (4.62) в уравнение (4.41) получим

$$\frac{V_{e}}{RT}\frac{dP}{dt} = \mu_{1}F_{1}\sqrt{\frac{2(P_{1}-P)}{x/\rho_{e}+(1-x)/\rho_{m}}} - \mu_{2}F_{2}K_{a}\sqrt{\frac{P(P-P_{2})}{RT}} - \mu_{3}F_{3}\sqrt{2\rho_{e}(P-P_{3})} + \frac{1}{2}F_{2}K_{a}\sqrt{\frac{P(P-P_{2})}{RT}} - \mu_{3}F_{3}\sqrt{2\rho_{e}(P-P_{3})} + \frac{1}{2}F_{2}K_{a}\sqrt{\frac{P(P-P_{2})}{RT}} - \frac{1}{2}F_{2}K_{a}}$$

$$+ 2L\sqrt{2HR_{1} - H^{2}}\frac{dH}{dt}\frac{P}{RT}.$$
(4.63)

Выражение (4.63) является нелинейным уравнением, которое необходимо линеаризовать. Переменными величинами в нем являются  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ , H.

Установившиеся значения этих переменных величин:

$$F_{1} \to F_{10}; F_{2} \to F_{20}; F_{3} \to F_{30}; P_{1} \to P_{10}; P \to P_{0}; \quad (4.64)$$
$$P_{2} \to P_{20}; P_{3} \to P_{30}; H \to H_{0}.$$

Координаты переменных величин, выраженные через приращения и установившиеся значения, имеют вид:

$$F_{1} = F_{10} + \Delta F_{1}; \quad F_{2} = F_{20} + \Delta F_{2}; \quad F_{3} = F_{30} + \Delta F_{3}; \quad P_{1} = P_{10} + \Delta P_{1}; P = P_{0} + \Delta P; \quad P_{2} = P_{20} + \Delta P_{2}; \quad P_{3} = P_{30} + \Delta P_{3}; \quad H = H_{0} + \Delta H.$$
(4.65)

После разложения уравнения (4.63) в ряд Тейлора по переменным согласно выражению (4.65), пренебрегая производными выше первого порядка и величинами второго порядка малости, получим

$$\frac{V_{2}}{RT}\frac{dP}{dt} = \mu_{1}F_{10}\sqrt{\frac{2(P_{10}-P_{0})}{\left[\frac{x}{\rho_{2}} + \frac{(1-x)}{\rho_{3c}}\right]}} - \mu_{2}F_{20}K_{a}\sqrt{\frac{P_{0}^{2} - P_{0}P_{20}}{RT}} - \mu_{3}F_{30}\sqrt{2\rho_{6}(P_{0}-P_{30})} + \frac{P_{0}^{2}}{RT}$$

$$+ \mu_{1} \sqrt{\frac{2(P_{10} - P_{0})}{\left[\frac{x}{\rho_{e}} + \frac{(1 - x)}{\rho_{m}}\right]}} \Delta F_{1} - \mu_{2} K_{a} \sqrt{\frac{P_{0}^{2} - P_{0} P_{20}}{RT}} \Delta F_{2} - \mu_{3} \sqrt{2\rho_{e} (P_{0} - P_{30})} \Delta F_{3} + \frac{(1 - x)}{\rho_{m}} \Delta F_{2} - \mu_{3} \sqrt{2\rho_{e} (P_{0} - P_{30})} \Delta F_{3} + \frac{(1 - x)}{\rho_{m}} \Delta F_{2} - \mu_{3} \sqrt{2\rho_{e} (P_{0} - P_{30})} \Delta F_{3} + \frac{(1 - x)}{\rho_{m}} \Delta F_{2} - \mu_{3} \sqrt{2\rho_{e} (P_{0} - P_{30})} \Delta F_{3} + \frac{(1 - x)}{\rho_{m}} \Delta F_{2} - \mu_{3} \sqrt{2\rho_{e} (P_{0} - P_{30})} \Delta F_{3} + \frac{(1 - x)}{\rho_{m}} \Delta F_{2} - \mu_{3} \sqrt{2\rho_{e} (P_{0} - P_{30})} \Delta F_{3} + \frac{(1 - x)}{\rho_{m}} \Delta F_{3}$$

$$+\frac{\mu_{1}F_{10}\frac{2}{\left[\frac{x}{\rho_{2}}+\frac{(1-x)}{\rho_{\infty}}\right]}}{2\sqrt{\left[\frac{x}{\rho_{2}}+\frac{(1-x)}{\rho_{\infty}}\right]}}\Delta P_{1}-\frac{\mu_{1}F_{10}\frac{2}{\left[\frac{x}{\rho_{2}}+\frac{(1-x)}{\rho_{\infty}}\right]}}{2\sqrt{\left[\frac{x}{\rho_{2}}+\frac{(1-x)}{\rho_{\infty}}\right]}}\Delta P_{2}-\frac{\mu_{2}F_{20}K_{a}(2P_{0}-P_{20})}{2RT\sqrt{\frac{P_{0}^{2}-P_{0}P_{20}}{RT}}}\Delta P_{2}-\frac{\mu_{3}F_{30}\rho_{\mu}}{\sqrt{2\rho_{6}(P_{0}-P_{30})}}\Delta P_{4}+\frac{\mu_{2}F_{20}K_{a}P_{0}}{\sqrt{2\rho_{6}(P_{0}-P_{30})}}\Delta P_{4}+\frac{\mu_{2}F_{20}K_{a}P_{0}}{2\sqrt{RT(P_{0}^{2}-P_{0}P_{20})}}\Delta P_{2}+\frac{\mu_{3}F_{30}\rho_{\mu}}{\sqrt{2\rho_{6}(P_{0}-P_{30})}}\Delta P_{3}+\frac{2LP_{0}}{RT}\sqrt{2H_{0}R_{1}-H_{0}^{2}}\Delta\frac{dH}{dt}.$$
 (4.66)

Для установившегося режима течения газожидкостной смеси в емкость устройства и в отдельности газа и жидкости из емкости уравнение (4.63), при значениях соотношений (4.64), принимает вид

$$\frac{V_{e}}{RT}\frac{dP_{0}}{dt} = \mu_{1}F_{10}\sqrt{\frac{2(P_{10}-P_{0})}{\left[\frac{x}{\rho_{e}} + \frac{(1-x)}{\rho_{\infty}}\right]}} - \mu_{2}F_{20}K_{a}\sqrt{\frac{P_{0}(P_{0}-P_{20})}{RT}} - \mu_{3}F_{30}\sqrt{2\rho_{e}(P_{0}-P_{30})} + 2L\sqrt{2H_{0}R_{1} - H_{0}^{2}}\frac{dH_{0}}{dt}\frac{P_{0}}{RT} = 0.$$
(4.67)

233

Из уравнения (4.67) определяем, что установившийся массовый расход газа и жидкости через газожидкостное устройство

$$G_{0} = \mu_{1}F_{10}\sqrt{\frac{2(P_{10} - P_{0})}{\left[\frac{x}{\rho_{2}} + \frac{(1 - x)}{\rho_{\infty}}\right]}} = \mu_{2}F_{20}K_{a}\sqrt{\frac{P_{0}(P_{0} - P_{20})}{RT}} + \mu_{3}F_{30}\sqrt{2\rho_{6}(P_{0} - P_{30})}.$$
 (4.68)

Если из уравнения (4.66) вычесть соответствующие части выражения (4.67), затем разделить обе части полученного соотношения на установившийся расход  $G_0$ , с учетом его значения по формуле (4.68), тогда получим

$$\frac{V_{2}P_{0}}{G_{0}RT}\frac{d(\Delta P/P_{0})}{dt} = \frac{\Delta F_{1}}{F_{10}} - \frac{\mu_{2}F_{20}K_{a}}{G_{0}}\sqrt{\frac{P_{0}^{2} - P_{0}P_{20}}{RT}}\frac{\Delta F_{2}}{F_{20}} - \frac{\mu_{3}F_{30}}{G_{0}}\sqrt{2\rho_{e}(P_{0} - P_{30})}\frac{\Delta F_{3}}{F_{30}} + \frac{P_{0}^{2}}{F_{30}}\frac{\Delta F_{2}}{F_{20}} - \frac{\mu_{3}F_{30}}{G_{0}}\sqrt{2\rho_{e}(P_{0} - P_{30})}\frac{\Delta F_{3}}{F_{30}} + \frac{P_{0}^{2}}{F_{30}}\frac{\Delta F_{2}}{F_{20}} - \frac{\mu_{3}F_{30}}{G_{0}}\sqrt{2\rho_{e}(P_{0} - P_{30})}\frac{\Delta F_{3}}{F_{30}} + \frac{P_{0}^{2}}{F_{20}}\frac{\Delta F_{2}}{F_{20}}\frac{\Delta F_{2}}\frac{\Delta F_{2}}{F_{20}}\frac{\Delta F_{2}}F_{2}\frac{\Delta F_{2}}\frac{\Delta F_{2}}\frac{\Delta F_{2}}\frac{\Delta F_{2}}\frac$$

$$+\frac{P_{10}}{2(P_{10}-P_{0})}\frac{\Delta P_{1}}{P_{10}}-\frac{P_{0}}{G_{0}}\left\{\frac{\mu_{1}F_{10}}{\sqrt{2[x/\rho_{2}+(1-x/\rho_{\mathcal{H}})](P_{10}-P_{0})}}+\frac{\mu_{2}F_{20}K_{a}(2P_{0}-P_{20})}{2\sqrt{RT(P_{0}^{2}-P_{0}P_{20})}}+\frac{\mu_{3}F_{30}\rho_{e}}{\sqrt{2\rho_{e}(P_{0}-P_{30})}}\right\}\frac{\Delta P}{P_{0}}+\frac{P_{0}F_{10}}{2\sqrt{RT(P_{0}^{2}-P_{0}P_{20})}}+\frac{P_{0}F_{10}}{\sqrt{2\rho_{e}(P_{0}-P_{30})}}$$

$$+\frac{\mu_{2}F_{20}K_{a}P_{0}P_{20}}{2G_{0}\sqrt{RT(P_{0}^{2}-P_{0}P_{20})}}\frac{\Delta P_{2}}{P_{20}}+\frac{\mu_{3}F_{30}P_{30}\rho_{e}}{G_{0}\sqrt{2\rho_{e}(P_{0}-P_{30})}}\frac{\Delta P_{3}}{P_{30}}+\frac{2LH_{0}P_{0}}{G_{0}RT}\sqrt{2H_{0}R_{1}-H_{0}^{2}}\frac{d(\Delta H/H_{0})}{dt}.$$
(4.69)

Введем следующие обозначения:

$$\begin{split} \frac{V_2 P_0}{G_0 RT} &= T_a; \quad \frac{\Delta P}{P_0} = x(t); \quad \frac{\Delta F_1}{F_{10}} = a(t); \quad \frac{\Delta F_2}{F_{20}} = b(t); \quad \frac{\Delta P_1}{P_{10}} = c(t); \\ \frac{\Delta P_2}{P_{20}} &= d(t); \quad \frac{\Delta P_3}{P_{30}} = m(t); \quad \frac{\Delta F_3}{F_{30}} = n(t); \quad \frac{\Delta H}{H_0} = \psi(t); \\ \frac{P_0}{2(P_{10} - P_0)} + \frac{P_0}{G_0} \left[ \frac{\mu_2 F_{20} K_a (2P_0 - P_{20})}{2\sqrt{RT(P_0^2 - P_0 P_{20})}} + \frac{\mu_3 F_{30} \rho_e}{\sqrt{2\rho_e(P_0 - P_{30})}} \right] = k_1; \\ \frac{\mu_2 F_{20} K_a}{G_0} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} = k_2; \end{split}$$

$$\frac{\mu_3 F_{30}}{G_0} \sqrt{2\rho_s (P_0 - P_{30})} = k_3; \qquad \frac{P_{10}}{2(P_{10} - P_0)} = k_5; \qquad \frac{\mu_2 F_{20} K_a P_0 P_{20}}{2G_0 \sqrt{RT(P_0^2 - P_0 P_{20})}} = k_6;$$

$$\frac{\mu_3 F_{30} P_{30} \rho_6}{G_0 \sqrt{2\rho_6 (P_0 - P_{30})}} = k_7; \qquad \frac{2L P_0 H_0}{G_0 RT} \sqrt{2H_0 R_1 - H_0^2} = T_6.$$
(4.70)

С учетом выражений (4.70) уравнение (4.69) принимает вид

$$T_a \frac{dx(t)}{dt} + k_1 x(t) = a(t) - k_2 b(t) - k_3 n(t) + k_5 c(t) + k_6 d(t) + k_7 m(t) + T_6 \frac{d\psi(t)}{dt}.$$
 (4.71)

В соотношении (4.71)  $T_a$  и  $T_e$  – постоянные времени, с, а  $k_1 - k_7$  – безразмерные коэффициенты.

После преобразования по Лапласу уравнения (4.71) получим

$$T_a sx(s) + k_1 x(s) = a(s) - k_2 b(s) - k_3 n(s) + k_5 c(s) + k_6 d(s) + k_7 m(s) + T_6 s \psi(s), \quad (4.72)$$

На рисунке 4.7 представлена структурная схема газожидкостного устройства как объекта автоматического управления по давлению газа, составленная по уравнению (4.72).



Рисунок 4.7 - Структурная схема газожидкостного устройства систем испытаний изделий на герметичность как объекта автоматического управления по давлению газа 4.4 Математическое моделирование газожидкостных устройств испытаний на герметичность изделий как объектов автоматического управления по уровню жидкости

4.4.1 Математическое моделирование газожидкостных устройств как объектов автоматического управления по уровню жидкости с учетом расходов газа и жидкости

Вывод обобщенного уравнения динамики газожидкостного устройства как объекта автоматического управления по уровню жидкости проводится на основании вышерассмотренного вывода обобщенного уравнения динамики газожидкостного устройства как объекта автоматического управления по давлению газа систем испытаний на герметичность изделий.

На рисунке 4.8 приведена схема газожидкостного устройства как объекта автоматического управления по уровню жидкости систем испытаний на герметичность. Она содержит трубопровод 1 подвода газожидкостной среды через клапан 2 в емкость 3. По трубопроводу 1 в системах испытаний на герметичность изделий, как отмечалось выше, может проходить жидкостная или газожидкостная среда.



Рисунок 4.8 – Схема газожидкостного устройства систем испытаний на герметичность как объекта автоматического управления по уровню жидкости

Емкость 3 в нижней части заполнена водой 4, а газ находится в верхней части 5 емкости. Газ отводится из емкости по трубопроводам 6 и 8 через регулирующий клапан 7. Трубопровод 10 предназначен для отвода воды из емкости. На этом трубопроводе устанавливается регулирующий клапан 9.

Динамика газожидкостных устройств как объектов автоматического управления по уровню жидкости рассматривается с учетом влияния давления газа на изменение уровня жидкости.

Состояние газа, находящегося в верхней части газожидкостного устройства, описывается уравнением  $PV_{z} = m R T$ , в котором P – давление газа в ем-

кости, Па;  $V_c$  – объем газового пространства емкости устройства, м<sup>3</sup>; m – масса газа в емкости устройства, кг; R – газовая постоянная газа, м<sup>2</sup>·c<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>; T – абсолютная температура газа, К.

Для газожидкостного устройства принимается, что в уравнении состоянии газа переменными величинами являются давление P, объем  $V_2$  и масса m. Дифференцируя уравнение состояния газа по принятым переменным от времени t, получим выражение (4.40). Уравнение (4.40) характеризует динамику газожидкостного устройства по давлению газа, который находится в верхней части емкости устройства над жидкостью (газожидкостной смесью), и давление газа в этом пространстве зависит от уровня жидкости.

Допустим, что на поверхности газожидкостной смеси в емкости (рисунок 4.8) находится условная пластина с отверстием, через которое проходит из жидкости в газовое пространство емкости газ с массовым расходом  $G_{e}$ . В этом случае уравнение динамики (4.40) принимает вид

$$\frac{P}{RT}\frac{dV_{z}}{dt} + \frac{V_{z}}{RT}\frac{dP}{dt} = G_{z} - G_{2}, \qquad (4.73)$$

где  $G_e$  – массовый расход газа, поступающего в газовое пространство из газожидкостной смеси устройства, кг/с;

*G*<sub>2</sub> – массовый расход газа, отводимый из емкости устройства через регулирующий клапан, кг/с.

Учитывая все принятые в предыдущем подразделе положения о модели газожидкостной смеси, о соотношении между газовой и жидкостной фазами в смеси, после подстановки выражения (4.62) в уравнение (4.73), получим

$$\frac{P}{RT}\left(-2L\sqrt{2HR_1-H^2}\right)\frac{dH}{dt} + \frac{V_2}{RT}\frac{dP}{dt} = G_2 - G_2.$$
(4.74)

Изменение массы газожидкостной смеси,  $dm_{cm}/dt$ , кг/с, в емкости газожидкостного устройства определяется выражением

$$dm_{cM} / dt = G_{cM} - G_{e} - G_{3}.$$
(4.75)

Принимая плотность газожидкостной смеси в емкости, равной  $\rho_{cm}$ , кг/м<sup>3</sup>, получим из уравнения (4.75)

$$\rho_{CM} \, dV_{CM} \,/ dt = G_{CM} - G_{2} - G_{3}, \tag{4.76}$$

где  $dV_{cM}/dt$  - изменение объема, м<sup>3</sup>/с, газожидкостной смеси в емкости.

Подставляя в формулу (4.76) вместо  $dV_{cm}/dt$  соотношение (4.60), вместо  $G_2$  выражение из соотношения (4.74), а вместо  $G_2$  и  $G_3$  выражения (4.53) и (4.54), получим

$$2L\sqrt{2HR_{1}-H^{2}}\frac{dH}{dt}\left(\rho_{cM}-\frac{P}{RT}\right) = \mu_{1}F_{1}\sqrt{2\rho_{cM}(P_{1}-P)} - \mu_{2}F_{2}k_{a}\sqrt{\frac{P(P-P_{2})}{RT}} - \mu_{3}F_{3}\sqrt{2\rho_{s}(P-P_{3})} - \frac{V_{c}}{RT}\frac{dP}{dt}.$$
(4.77)

Установившиеся значения переменных величин уравнения (4.77):  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $P_1$ , P,  $P_2$ ,  $P_3$ , H обозначаем как:

 $F_{10}$ ,  $F_{20}$ ,  $F_{30}$ ,  $P_{10}$ ,  $P_0$ ,  $P_{20}$ ,  $P_{30}$ ,  $H_0$ ,

а координаты переменных величин, выраженные через приращения и установившиеся значения, принимают вид:

$$F_1 = F_{10} + \Delta F_1; \qquad F_2 = F_{20} + \Delta F_2; \qquad F_3 = F_{30} + \Delta F_3; \qquad P_1 = P_{10} + \Delta P_1;$$
  
$$P = P_0 + \Delta P$$

$$P_2 = P_{20} + \Delta P_2; \quad P_3 = P_{30} + \Delta P_3; \quad H = H_0 + \Delta H; \quad \Delta H^1; \quad \Delta P^1.$$
(4.78)

•

Для линеаризации уравнения (4.77) разлагаем его в ряд Тейлора по переменным согласно выражениям (4.78), пренебрегая производными выше первого порядка и величинами второго порядка малости

$$2L\sqrt{2H_0R_1 - H_0^2} \left(\rho_{cM} - \frac{P_0}{RT}\right) \frac{d(\Delta H)}{dt} = \mu_1 F_{10} \sqrt{2\rho_{cM}(P_{10} - P_0)} - \mu_2 F_{20} K_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} - \frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT} - \frac{P_0(P_0$$

$$-\mu_{3}F_{30}\sqrt{2\rho_{e}(P_{0}-P_{30})} + \mu_{1}\sqrt{2\rho_{cm}(P_{10}-P_{0})}\Delta F_{1} - \mu_{2}K_{a}\sqrt{\frac{P_{0}(P_{0}-P_{20})}{RT}}\Delta F_{2} - \mu_{1}K_{a}\sqrt{\frac{P_{0}(P_{0}-P_{20})}{RT}}\Delta F_{2} - \mu_{1}K_{a}\sqrt{\frac{P_{0}(P_{0}-P_{20})}{RT}}}\Delta F_{2} - \mu_{1}K_{a}\sqrt{\frac{P_{0}(P_{0}-P_{20})}{RT}}\Delta F_{2} - \mu_{1}K_{a}\sqrt{\frac{P_{0}(P_{0}-P_{20})}{RT}}}\Delta F_{2} - \mu$$

$$- \mu_{3} \sqrt{2 \rho_{e} (P_{0} - P_{30})} \Delta F_{3} + \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P_{0})}} \Delta P_{1} - \mu_{1} F_{10} \frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2 \rho_{cM} (P_{10} - P$$

$$-\left[\mu_{1}F_{10}\frac{\rho_{cM}}{\sqrt{2\rho_{cM}(P_{10}-P_{0})}}+\mu_{2}F_{20}K_{a}\frac{(2P_{0}-P_{20})}{2\sqrt{RTP_{0}(P_{0}-P_{20})}}+\mu_{3}F_{30}\frac{\rho_{H}}{\sqrt{2\rho_{e}(P_{0}-P_{30})}}\right]\Delta P+$$

\_

$$+\mu_{2}F_{20}K_{a}\frac{P_{0}}{2\sqrt{RTP_{0}(P_{0}-P_{20})}}\Delta P_{2}+\mu_{3}F_{30}\frac{\rho_{H}}{\sqrt{2\rho_{e}(P_{0}-P_{30})}}\Delta P_{3}-\frac{V_{z}}{RT}\frac{d\left(\Delta P\right)}{dt}.$$
 (4.79)

Для установившегося режима течения газожидкостной смеси в емкость установки и в отдельности газа и жидкости из установки уравнение (4.79) принимает вид

$$2L\sqrt{2H_0R_1 - H_0^2} \frac{dH_0}{dt} \left(\rho_{cM} - \frac{P_0}{RT}\right) = \mu_1 F_{10} \sqrt{2\rho_{cM}(P_{10} - P_0)} - \mu_2 F_{20} K_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} - \mu_3 F_{30} \sqrt{2\rho_s(P_0 - P_{30})} - \frac{V_2}{RT} \frac{dP_0}{dt} = 0.$$

$$(4.80)$$

Уравнение (4.80) определяет установившийся массовый расход газа и жидкости G<sub>0</sub>, кг/с, через газожидкостное устройство

$$G_0 = \mu_1 F_{10} \sqrt{2\rho_{cM}(P_{10} - P_0)} = \mu_2 F_{20} K_a \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} + \mu_3 F_{30} \sqrt{2\rho_6(P_0 - P_{30})} .$$
(4.81)

Если из уравнения (4.79) вычесть соответствующие части уравнения (4.80), затем разделить обе части полученного выражения на установившийся расход  $G_0$  с учетом его значения по формуле (4.81), тогда получим

$$\frac{2LH_0\sqrt{2H_0R_1-H_0^2}}{G_0}\left(\rho_{\rm CM}-\frac{P_0}{RT}\right)\frac{d(\Delta H/H_0)}{dt} = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\mu_2F_{20}K_a}{G_0}\sqrt{\frac{P_0(P_0-P_{20})}{RT}}\frac{\Delta F_2}{F_{20}} - \frac{P_0}{RT}\frac{d(\Delta H/H_0)}{dt} = \frac{\Delta F_1}{RT} - \frac{\mu_2F_{20}K_a}{RT}\sqrt{\frac{P_0(P_0-P_{20})}{RT}}\frac{\Delta F_2}{F_{20}} - \frac{P_0}{RT}\frac{d(\Delta H/H_0)}{dt} = \frac{\Delta F_1}{RT} - \frac{P_0}{RT}\frac{d(\Delta H/H_0)}{RT} = \frac{P_0}{RT} - \frac{P_0}{RT}\frac{d(\Delta H/H_0)}{RT} = \frac{P_0}{RT} - \frac{P_0}{RT}\frac{d(\Delta H/H_0)}{RT} = \frac{P_0}{RT}\frac{d(\Delta H/H_0)}{RT}$$

$$-\frac{\mu_{3}F_{30}}{G_{0}}\sqrt{2\rho_{e}(P_{0}-P_{30})}\frac{\Delta F_{3}}{F_{30}}+\frac{P_{10}}{2(P_{10}-P_{0})}\frac{\Delta P_{1}}{P_{10}}-P_{0}\cdot\left[\frac{1}{2(P_{10}-P_{0})}+\frac{1}{2(P_{10}$$

$$+\frac{\mu_{2}F_{2}K_{a}}{G_{0}}\frac{(2P_{0}-P_{20})}{2\sqrt{RT(P_{0}^{2}-P_{0}P_{20})}}+\frac{\mu_{3}F_{30}}{G_{0}}\frac{\rho_{6}}{\sqrt{2\rho_{6}(P_{0}-P_{30})}}\right]\frac{\Delta P}{P_{0}}+$$

$$+\frac{\mu_{2}F_{20}K_{a}P_{20}}{G_{0}}\frac{P_{0}}{2\sqrt{RT(P_{0}^{2}-P_{0}P_{20})}}\frac{\Delta P_{2}}{P_{20}}+\frac{\mu_{3}F_{30}P_{30}}{G_{0}}\frac{\rho_{e}}{\sqrt{2\rho_{e}(P_{0}-P_{30})}}\frac{\Delta P_{3}}{P_{30}}-\frac{V_{e}P_{0}}{G_{0}RT}\frac{d(\Delta P/P_{0})}{dt}.$$
(4.82)

٦

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \frac{V_{c}P_{0}}{G_{0}RT} = T_{a}; \quad \frac{\Delta P}{P_{0}} = x(t); \quad \frac{\Delta F_{1}}{F_{10}} = a(t); \quad \frac{\Delta F_{2}}{F_{20}} = b(t); \quad \frac{\Delta P_{1}}{P_{10}} = c(t); \\ \frac{\Delta P_{2}}{P_{20}} = d(t); \quad \frac{\Delta P_{3}}{P_{30}} = m(t); \quad \frac{\Delta F_{3}}{F_{30}} = n(t); \quad \frac{\Delta H}{H_{0}} = \psi(t); \\ \frac{P_{0}}{2(P_{10} - P_{0})} + \frac{P_{0}}{G_{0}} \left[ \frac{\mu_{2}F_{20}K_{a}(2P_{0} - P_{20})}{2\sqrt{RT(P_{0}^{2} - P_{0}P_{20})}} + \frac{\mu_{3}F_{30}\rho_{e}}{\sqrt{2\rho_{e}(P_{0} - P_{30})}} \right] = k_{1}; \\ \frac{\mu_{2}F_{20}K_{a}}{G_{0}}\sqrt{\frac{P_{0}(P_{0} - P_{20})}{RT}} = k_{2}; \quad \frac{\mu_{3}F_{30}}{G_{0}}\sqrt{2\rho_{e}(P_{0} - P_{30})} = k_{3}; \\ \frac{P_{10}}{2(P_{10} - P_{0})} = k_{5}; \quad \frac{\mu_{2}F_{20}K_{a}P_{0}P_{20}}{2G_{0}\sqrt{RT(P_{0}^{2} - P_{0}P_{20})}} = k_{6}; \\ \frac{\mu_{3}F_{30}P_{30}\rho_{e}}{G_{0}\sqrt{2\rho_{e}(P_{0} - P_{30})}} = k_{7}; \quad \frac{2LH_{0}\sqrt{2H_{0}R_{1} - H_{0}^{2}}}{G_{0}} \left(\rho_{cM} - \frac{P_{0}}{RT}\right) = T_{\mu}. \quad (4.83) \end{aligned}$$

С учетом выражений (4.83) уравнение (4.82) принимает вид

$$T_{\mu}\frac{d\psi(t)}{dt} = a(t) - k_2b(t) - k_3n(t) + k_5c(t) + k_6d(t) + k_7m(t) - T_a\frac{dx(t)}{dt} - k_1x(t) . \quad (4.84)$$

После преобразования по Лапласу уравнения (4.84) получим

$$T_{H}s\psi(s) = a(s) - k_{2}b(s) - k_{3}n(s) + k_{5}c(s) + k_{6}d(s) + k_{7}m(s) - T_{a}sx(s) - k_{1}x(s).$$
(4.85)

На рисунке 4.9 представлена структурная схема газожидкостного устройства систем испытаний на герметичность изделий как объекта автоматического управления по уровню жидкости.



Рисунок 4.9 – Структурная схема газожидкостного устройства систем испытаний на герметичность изделий как объекта автоматического управления по уровню жидкости

### 4.4.2 Варианты математического моделирования газожидкостных устройств как объектов автоматического управления по уровню жидкости с учетом расхода жидкости

Методика вывода обобщенного уравнения динамики газожидкостного устройства как объекта автоматического управления по уровню жидкости, приведенная выше, позволяет анализировать и решать различные варианты работы газожидкостного устройства. Рассмотрим в качестве примеров несколько вариантов обобщенного уравнения динамики газожидкостных устройств как объектов автоматического управления по уровню жидкости.

4.4.2.1 Заполнение емкости газожидкостного устройства жидкостью от нулевого уровня до заданного или максимального значения

Емкость 3 газожидкостного устройства (рисунок 4.8) заполняется жидкостью от нулевого уровня до заданного или максимального значения. В этом варианте работы устройства клапан 9 перекрывается, а поэтому  $G_3 = 0$ ;  $P_3 = 0$ ;  $F_3 = 0$  и  $\rho_{cM} = \rho_{\theta}$ . Кроме того, в этом варианте работы устройства возможны два подварианта:

а) Вместо клапана 7 установлен регулятор давления, который поддерживает давление в емкости постоянным и большим нулевого значения. В этом случае во всех формулах вывода обобщенного уравнения динамики газожидкостного устройства как объекта автоматического управления по уровню жидкости вместо давления P можно подставить его числовое значение и все производные от этого давления по времени будут равны нулю. Сечение  $F_2$  регулирующего органа регулятора давления и давление  $P_2$  после этого регулятора сохраняются во всех соотношениях. С учетом принятых условий уравнение (4.82) принимает следующий вид

$$\frac{2LH_0\sqrt{2H_0R_1 - H_0^2}}{G_0} \left(\rho_{\theta} - \frac{P_0}{RT}\right) \frac{d(\Delta H/H_0)}{dt} = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\mu_2 F_{20} K_a}{G_0} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} \frac{\Delta F_2}{F_{20}} + \frac{P_{10}}{2\left(P_{10} - P_0\right)} \frac{\Delta P_1}{P_{10}} + \frac{\mu_2 F_{20} K_a P_{20}}{G_0} \frac{P_0}{2\sqrt{RT(P_0^2 - P_0 P_{20})}} \frac{\Delta P_2}{P_{20}}.$$
(4.86)

Введем следующие обозначения с учетом соотношений (4.83):

$$\frac{\Delta F_1}{F_{10}} = a(t); \quad \frac{\Delta F_2}{F_{20}} = b(t); \quad \frac{\Delta P_1}{P_{10}} = c(t); \quad \frac{\Delta P_2}{P_{20}} = d(t); \quad \frac{\Delta H}{H_0} = \psi(t);$$

$$\frac{\mu_2 F_{20} K_a}{G_0} \sqrt{\frac{P_0 (P_0 - P_{20})}{RT}} = k_2; \quad \frac{P_{10}}{2 (P_{10} - P_0)} = k_5;$$

$$\frac{\mu_2 F_{20} K_a P_0 P_{20}}{2G_0 \sqrt{RT(P_0^2 - P_0 P_{20})}} = k_6; \quad \frac{2LH_0 \sqrt{2H_0 R_1 - H_0^2}}{G_0} \left(\rho_{cM} - \frac{P_0}{RT}\right) = T_{\mu}. \quad (4.87)$$

С учетом выражений (4.87) уравнение (4.86) принимает вид

$$T_{\mu}\frac{d\psi(t)}{dt} = a(t) - k_2 b(t) + k_5 c(t) + k_6 d(t).$$
(4.88)

б) Трубопровод 6 (рисунок 4.8) соединяется с атмосферой, тогда  $P = P_2$ = 0 и  $F_2 = 0$  (потому, что отсутствует клапан). С учетом принятых условий из выражения (4.82) получим

$$\frac{2\rho_{cM}LH_0\sqrt{2H_0R_1-H_0^2}}{G_0}\frac{d\left(\frac{\Delta H}{H_0}\right)}{dt} = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} + \frac{1}{2}\frac{\Delta P_1}{P_{10}}.$$
(4.89)

Введем следующие обозначения с учетом соотношений (4.83):

$$\frac{\Delta F_1}{F_{10}} = a(t); \quad \frac{\Delta P_1}{P_{10}} = c(t); \quad \frac{\Delta H}{H_0} = \psi(t); \quad \frac{1}{2} = k_5;$$

$$\frac{2\rho_{cM}LH_0\sqrt{2H_0R_1 - H_0^2}}{G_0} = T_{\mu}. \quad (4.90)$$

С учетом выражений (4.90) уравнение (4.89) принимает вид

$$T_{\mu}\frac{d\psi(t)}{dt} = a(t) + k_5 c(t).$$
(4.91)

4.2.2.2 Снижение уровня жидкости в изделии от верхнего до нижнего значения

В емкости 3 (рисунок 4.8) уровень снижается от верхнего до нижнего значения под действием давления газа в емкости и сил земного тяготения. Свободный слив жидкости из емкости не рассматривается потому, что в газожидкостных устройствах систем испытаний на герметичность изделий он практически не используется.

При этом варианте условий можно закрыть клапан 2 и подавать газ (сжатый воздух) под давлением через клапан 7. В этом случае  $F_1 = 0$ ;  $P_1 = 0$  и  $\rho_{cm} = \rho_{c}$ . Давление газа в емкости *P* определяет расход жидкости через клапан 9 и время слива жидкости из емкости.

С учетом принятых условий уравнение (4.82) принимает вид

$$\frac{2LH_0\sqrt{2H_0R_1 - H_0^2}}{G_0} \left(\rho_{CM} - \frac{P_0}{RT}\right) \frac{d(\Delta H/H_0)}{dt} = \frac{\mu_2 F_{20}K_a}{G_0} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT}} \frac{\Delta F_2}{F_{20}} - \frac{\mu_3 F_{30}}{G_0} \sqrt{2 \rho_s (P_0 - P_{30})} \frac{\Delta F_3}{F_{30}} - P_0 \cdot \left[\frac{1}{2(-P_0)} + \frac{\mu_3 F_{30}}{F_{30}} + \frac{\mu_3 F_{30}}$$

$$+\frac{\mu_{2}F_{2}K_{a}}{G_{0}}\frac{(2P_{0}-P_{20})}{2\sqrt{RT(P_{0}^{2}-P_{0}P_{20})}}+\frac{\mu_{3}F_{30}}{G_{0}}\frac{\rho_{s}}{\sqrt{2\rho_{s}(P_{0}-P_{30})}}\right]\frac{\Delta P}{P_{0}}+$$

$$+\frac{\mu_{2}F_{20}K_{a}P_{20}}{G_{0}}\frac{P_{0}}{2\sqrt{RT(P_{0}^{2}-P_{0}P_{20})}}\frac{\Delta P_{2}}{P_{20}}+\frac{\mu_{3}F_{30}P_{30}}{G_{0}}\frac{\rho_{e}}{\sqrt{2\rho_{e}(P_{0}-P_{30})}}\frac{\Delta P_{3}}{P_{30}}-\frac{V_{e}P_{0}}{G_{0}RT}\frac{d(\Delta P/P_{0})}{dt}.$$

$$(4.92)$$

Введем обозначения:

$$\frac{V_{c}P_{0}}{G_{0}RT} = T_{a}; \quad \frac{\Delta P}{P_{0}} = x(t); \qquad \frac{\Delta F_{2}}{F_{20}} = b(t); \qquad \frac{\Delta P_{2}}{P_{20}} = d(t);$$

$$\frac{\Delta P_{3}}{P_{30}} = m(t); \qquad \frac{\Delta F_{3}}{F_{30}} = n(t); \qquad \frac{\Delta H}{H_{0}} = \psi(t);$$

$$-\frac{1}{2} + \frac{P_{0}}{G_{0}} \left[ \frac{\mu_{2}F_{20}K_{a}(2P_{0} - P_{20})}{2\sqrt{RT(P_{0}^{2} - P_{0}P_{20})}} + \frac{\mu_{3}F_{30}\rho_{a}}{\sqrt{2\rho_{a}(P_{0} - P_{30})}} \right] = k_{1};$$

$$\frac{\mu_{2}F_{20}K_{a}}{G_{0}} \sqrt{\frac{P_{0}(P_{0} - P_{20})}{RT}} = k_{2};$$

$$\frac{\mu_{3}F_{30}}{G_{0}} \sqrt{2\rho_{a}(P_{0} - P_{30})} = k_{3}; \qquad \frac{\mu_{2}F_{20}K_{a}P_{0}P_{20}}{2G_{0}\sqrt{RT(P_{0}^{2} - P_{0}P_{20})}} = k_{6};$$

$$\mu_{c}F_{c}P_{c}Q \qquad 2IH_{c}\sqrt{2H_{c}R_{c} - H_{c}^{2}} \left( \sum_{P_{c}} P_{c} \right)$$

$$\frac{\mu_3 F_{30} P_{30} \rho_{\theta}}{G_0 \sqrt{2\rho_{\theta} (P_0 - P_{30})}} = k_7; \qquad \frac{2LH_0 \sqrt{2H_0 R_1 - H_0^2}}{G_0} \left(\rho_{CM} - \frac{P_0}{RT}\right) = T_H + \frac{1}{2} \left(\frac{P_0 P_0 P_0}{RT}\right) = T_H + \frac{1}{2} \left(\frac{P_0 P_0}{RT}\right) = T_H + \frac{1}{2$$

(4.93)

С учетом выражений (4.93) уравнение (4.92) принимает вид

$$T_{\mu}\frac{d\psi(t)}{dt} = -k_2b(t) - k_3n(t) + k_6d(t) + k_7m(t) - T_a\frac{dx(t)}{dt} - k_1x(t).$$
(4.94)

После преобразования по Лапласу уравнения (4.94) получим

$$T_{H}s\psi(s) = -k_{2}b(s) - k_{3}n(s) + k_{6}d(s) + k_{7}m(s) - T_{a}sx(s) - k_{1}x(s)$$

На рисунке 4.10 приведены дифференциальные уравнения газожидкостных устройств систем испытаний изделий на герметичность как объектов автоматического управления по давлению газа и по уровню жидкости и различные частные случаи этих уравнений. Математическое моделирование газожидкостных устройств как объектов автоматического управления



автоматизированных систем испытаний изделий на герметичность

## 4.5 Математическое моделирование динамики изделий, испытываемых на герметичность перегретым водяным паром, как объектов автоматического управления

Использование перегретого водяного пара для испытаний на герметичность изделий имеет ряд существенных преимуществ по сравнению, например, с применением сжатого воздуха. С помощью перегретого водяного пара испытываемое на герметичность изделие подогревается, микрощели, имеющиеся в нем, увеличиваются и расход водяного пара имеет большее значение, которое легче обнаружить.

Водяной пар имеется фактически на каждом промышленном предприятии или может быть легко получен при использованием малогабаритных паровых установок, например, широко распространенных в медицинских учреждениях. Перед испытаниями на герметичность изделия с использованием перегретого пара, подводимого внутрь при заданном давлении, необходимо прогреть его поверхности и полностью удалить (испарить) с них влагу, распределенную как в виде тонких пленок, так и в виде капель воды.

Только после полного удаления влаги с поверхностей приступают к испытаниям на герметичность изделия, исключая таким образом влияния на показания прибора герметичности водяного пара, который образуется от испарения влаги с поверхностей изделия.

Эти процессы в виде схемы физической модели прогрева изделия, испытываемого на герметичность перегретым водяным паром, как объекта автоматического управления, представлены на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11 – Схема модели прогрева изделия, испытываемого на герметичность перегретым водяным паром, как объекта автоматического управления

В принимаемой модели конденсат, который образуется внутри изделия при его прогреве, заменяется водой, которая подводится через клапан 4. Расход этой воды в теоретических положениях может изменяться от нулевого до заданного значения. Нулевой расход воды соответствует случаю, когда изделие прогрето и не происходит превращения конденсата, находящегося внутри изделия, в пар.

Клапаны 1 и 3 предназначены для создания заданного давления водяного пара в изделии 2 и поддержания необходимого расхода перегретого водяного через изделие при его прогреве. При испытаниях изделия на герметичность клапаны 1 и 3 полностью перекрываются. Математическое описание подобной модели применительно к редукционно-охладительным установкам перегретого водяного пара промышленных котельных и тепловых электрических станций.

Течение водяного пара через клапан 1 (рисунок 4.11) модели прогрева изделия, испытываемого на герметичность, принимается сверхкритическим, а течение водяного пара через клапан 3 докритическим. Уравнение состояния газа [69] или перегретого водяного пара применительно к изделию 2, испытываемого на герметичность, имеет вид

$$PV/RT = m, \qquad (4.95)$$

где *Р* - давление водяного пара в изделии, Па;

V - объем изделия, м<sup>3</sup>;

М - масса водяного пара в изделии, кг;

Т - абсолютная температура водяного пара в изделии, К;

R - газовая постоянная водяного пара, м<sup>2</sup>·c<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>.

В изделии, испытываемом на герметичность перегретым водяным паром, понижаются давление и температура водяного пара, то есть, изменяются во времени в формуле (4.95) величины m, P и T, а объем камеры V остается неизменным. Поэтому возьмем в уравнении (4.95) производную от трех переменных во времени

$$\frac{V}{RT}\frac{dP}{dt} - \frac{PV}{RT^2}\frac{dT}{dt} = \frac{dm}{dt}.$$
(4.96)

В этом выражении *dm/dt*, кг/с - изменение массового расхода водяного пара через изделие

$$dm/dt = G_1 - G_2 + G_3, (4.97)$$

где G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> – массовый расход водяного пара, поступающего в изделие и уходящего из изделия, кг/с;

 $G_3$  – массовый расход воды, поступающей в изделие, кг/с. Уравнение (4.96) с учетом (4.97) принимает вид

$$\frac{V}{RT}\frac{dP}{dt} - \frac{PV}{RT^2}\frac{dT}{dt} = G_1 - G_2 + G_3.$$
(4.98)

Для сверхкритического течения водяного пара через клапан 2 сечением *F*<sub>1</sub> массовый расход определяется по формуле [77]

$$G_1 = \frac{\mu K_a F_1}{\sqrt{RT}} P_1,$$
(4.99)

где  $\mu_1$  - коэффициент расхода водяного пара через клапан 1;

 $F_1$  - площадь проходного сечения клапана 1, м<sup>2</sup>;

Р<sub>1</sub>- давление водяного пара до клапана 1, Па;

 $K_a$  – коэффициент, определяемый по формуле (4.7) по коэффициенту адиабаты водяного пара  $\kappa = 1,3$ .

Для докритического массового расхода [77] водяного пара через клапан 3 модели прогрева изделия используем уравнение

$$G_2 = \mu_2 K_a F_2 \sqrt{\frac{P(P - P_2)}{RT}},$$
(4.100)

где  $\mu_2$  - коэффициент расхода водяного пара через клапан 3 модели прогрева изделия;

 $F_2$  - площадь проходного сечения клапана 3, м<sup>2</sup>;

*Р* и *P*<sub>2</sub> - давления водяного пара в камере 2 и в выходном трубопроводе после клапана 3, Па.

Массовый расход воды, кг/с, поступающей в изделие, испытываемое на герметичность перегретым водяным паром, определим по [61]

$$G_3 = \mu_3 F_3 \sqrt{2\rho(P_3 - P)}, \qquad (4.101)$$

где *µ*<sub>3</sub> - коэффициент расхода воды через клапан 4;

 $F_3$  – площадь проходного сечения клапана 4 подвода воды в изделие, м<sup>3</sup>;

Р<sub>3</sub> - давление воды до клапана 4 подвода воды в изделие, Па;

 $\rho$  - плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

Уравнение (4.98) с учетом выражений (4.99), (4.100) и (4.101) принимает вид

$$\frac{V}{RT}\frac{dP}{dt} - \frac{PV}{RT^2}\frac{dT}{dt} = \frac{\mu_1 K_a F_1}{\sqrt{RT}}P_1 - \mu_2 K_a F_2 \sqrt{\frac{P(P-P_2)}{RT}} + \mu_3 F_3 \sqrt{2\rho(P_3-P)} .$$
(4.102)

Уравнение (4.102) нелинейное и его необходимо линеаризовать. Переменными величинами в нем являются  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $P_1$ , P,  $P_2$ , T и  $P_3$ . Установившиеся значения этих переменных величин обозначаем:

Координаты переменных величин, выраженные через приращения и установившиеся значения, имеют вид:

$$F_{1} = F_{10} + \Delta F_{1}; \quad F_{2} = F_{20} + \Delta F_{2}; \quad F_{3} = F_{30} + \Delta F_{3}; \quad P_{1} = P_{10} + \Delta P_{1}; \\ P = P_{0} + \Delta P; \quad P_{2} = P_{20} + \Delta P_{2}; \quad T = T_{0} + \Delta T; \quad P_{3} = P_{30} + \Delta P_{3}.$$
(4.104)

Для линеаризации уравнения (4.102) разложим его в ряд Тейлора по переменным  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $P_1$ , P,  $P_2$ , T и  $P_3$ 

$$\frac{V}{RT_{0}}\frac{dP}{dt} - \frac{P_{0}V}{RT_{0}^{2}}\frac{dT}{dt} = \frac{\mu_{1}K_{a}F_{10}P_{10}}{\sqrt{RT_{0}}} + \frac{\mu_{1}K_{a}P_{10}}{\sqrt{RT_{0}}}\Delta F_{1} + \frac{\mu_{1}K_{a}F_{10}}{\sqrt{RT_{0}}}\Delta P_{1} - \frac{1}{2}\frac{\mu_{1}K_{a}F_{10}P_{10}}{T_{0}\sqrt{RT_{0}}}\Delta T - \frac{\mu_{2}K_{a}F_{20}\sqrt{P_{0}(P_{0} - P_{20})}}{\sqrt{RT_{0}}} - \mu_{2}K_{a}\sqrt{\frac{P_{0}(P_{0} - P_{20})}{RT_{0}}}\Delta F_{2} - \frac{1}{2}\frac{\mu_{2}K_{a}F_{20}(2P_{0} - P_{20})}{\sqrt{RT_{0}}\sqrt{P_{0}(P_{0} - P_{20})}}\Delta P + \frac{\mu_{2}K_{a}F_{20}\sqrt{P_{0}(P_{0} - P_{20})}}{\sqrt{RT_{0}}}\Delta F_{2} + \frac{1}{2}\frac{\mu_{2}K_{a}F_{20}\sqrt{P_{0}(P_{0} - P_{20})}}{T_{0}\sqrt{RT_{0}}}\Delta T + \mu_{3}F_{30}\sqrt{2\rho(P_{30} - P_{0})} + \frac{\mu_{3}\sqrt{2\rho(P_{30} - P_{0})}}{2\sqrt{RT_{0}}\sqrt{P_{0}(P_{0} - P_{20})}}\Delta F_{3} + \frac{1}{2}\mu_{3}F_{30}\sqrt{\frac{2\rho}{(P_{30} - P_{0})}}\Delta P_{3} - \frac{1}{2}\mu_{3}F_{30}\sqrt{\frac{2\rho}{(P_{30} - P_{0})}}\Delta P . \quad (4.105)$$

Для установившегося режима течения водяного пара через изделие, испытываемое на герметичность, и установившегося поступления воды в это изделие уравнение (4.102), при значениях выражений (4.103), принимает вид

$$\frac{V}{RT_0}\frac{dP}{dt} - \frac{P_0V}{RT_0^2}\frac{dT}{dt} = \frac{\mu_1 K_a F_{10} P_{10}}{\sqrt{RT_0}} - \mu_2 K_a F_{20} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT_0}} + \mu_3 F_{30} \sqrt{2\rho(P_{30} - P_0)} = 0.$$
(4.106)

Из уравнения (4.106) установившийся расход водяного пара и воды через изделие

$$G_0 = \frac{\mu_1 K_a F_{10} P_{10}}{\sqrt{RT_0}} + \mu_3 F_{30} \sqrt{2\rho(P_{30} - P_0)} = \mu_2 K_a F_{20} \sqrt{\frac{P_0(P_0 - P_{20})}{RT_0}}.$$
 (4.107)

Количество воды, подаваемой в изделие, в общем случае пропорционально расходу водяного пара через модель, как в динамическом, так и в установившемся режиме. Если обозначить в уравнении (4.107)

$$G_{0n} = \frac{\mu_1 K_a F_{10} P_{10}}{\sqrt{RT_0}} \quad \text{M} \quad G_{0e} = \mu_3 F_{30} \sqrt{2\rho(P_{30} - P_0)} , \qquad (4.108)$$

где  $G_{0n}$  и  $G_{0e}$  – установившиеся массовые расходы, кг/с, водяного пара и охлаждающей воды,

тогда из уравнений (4.107) и (4.108) получим, что

$$G_0 = G_{0n} + G_{0e}. \tag{4.109}$$

Принимаем, что между  $G_{0n}$  и  $G_{0e}$  имеется пропорциональность

$$G_{0e} = \kappa_{en} G_{0n}, \qquad (4.110)$$

где  $\kappa_{en}$  – коэффициент соотношения массовых расходов воды и пара, поступающих изделие,  $\kappa_{en} > 0$ .

Из соотношений (4.109) и (4.110) получим

$$G_0 = G_{0n}(1 + \kappa_{en}) \quad \text{if} \qquad G_0 = G_{0e}(1 + 1/\kappa_{en}). \tag{4.111}$$

С учетом выражений (4.108) формулы (4.111) принимают вид:

$$G_0 = (1 + \kappa_{en}) \frac{\mu_1 K_a F_{10} P_{10}}{\sqrt{RT_0}} \quad \text{M} \quad G_0 = \left(1 + \frac{1}{\kappa_{en}}\right) \mu_3 F_{30} \sqrt{2\rho(P_{30} - P_0)} \,. \tag{4.112}$$

Если из уравнения (4.105) вычесть уравнение (4.107), затем разделить обе части полученного выражения на установившийся расход  $G_0$ , с учетом его значений по формулам (4.107) и (4.112), тогда получим

$$\frac{VP_{0}}{G_{0}RT_{0}}\frac{d(\Delta P/P_{0})}{dt} + \frac{1}{2}\left[\frac{(2P_{0} - P_{20})}{(P_{0} - P_{20})} + \frac{\kappa_{en} \cdot P_{0}}{(P_{30} - P_{0})(\kappa_{en} + 1)}\right]\frac{\Delta P}{P_{0}} = \frac{1}{(\kappa_{en} + 1)}\frac{\Delta F_{1}}{F_{10}} - \frac{\Delta F_{2}}{F_{20}} + \frac{\kappa_{en} \cdot P_{0}}{F_{20}} + \frac{\kappa_{$$

Введем обозначения:

$$\frac{VP_0}{G_0RT_0} = T_a; \quad \frac{\Delta P}{P_0} = x(t); \quad \frac{\Delta F_1}{F_{10}} = a(t); \quad \frac{\Delta F_2}{F_{20}} = b(t); \quad \frac{\Delta P_1}{P_{10}} = c(t);$$

$$\frac{\Delta P_2}{P_{20}} = d(t); \quad \frac{\Delta P_3}{P_{30}} = m(t); \quad \frac{\Delta T}{T_0} = \alpha(t); \quad \frac{\Delta F_3}{F_{30}} = n(t);$$

$$\frac{1}{2} \left[ \frac{2P_0 - P_{20}}{P_0 - P_{20}} + \frac{\kappa_{en} \cdot P_0}{(P_{30} - P_0)(\kappa_{en} + 1)} \right] = k_1; \quad \frac{1}{\kappa_{en} + 1} = \kappa_2;$$

$$\frac{P_{20}}{2(P_0 - P_{20})} = \kappa_3; \quad \frac{\kappa_{en}}{\kappa_{en} + 1} = \kappa_4; \quad \frac{P_{30}}{2(P_{30} - P_0)} = \kappa_5. \quad (4.114)$$

С учетом выражений (4.114) уравнение (4.111) принимает вид

$$T_{a} \frac{dx(t)}{dt} + \kappa_{1}x(t) = \kappa_{2}a(t) - b(t) + \kappa_{2}c(t) + \kappa_{3}d(t) +$$

$$+\kappa_4 n(t) + \kappa_4 \kappa_5 m(t) + T_a \frac{d\alpha(t)}{dt} + \frac{\kappa_4}{2} \alpha(t).$$
(4.115)

После преобразования по Лапласу уравнения (4.115) получим

$$(T_a s + \kappa_1) x(s) = \kappa_2 a(s) - b(s) + \kappa_2 c(s) + \kappa_3 d(s) + \kappa_4 n(s) + \kappa_4 \kappa_5 m(s) + \left(T_a s + \frac{\kappa_4}{2}\right) \alpha(s).$$
(4.116)

На рисунке 4.12 представлена структурная схема модели прогрева изделия, испытываемого на герметичность, перегретым водяным паром, составленная по уравнению (4.116).

Составим уравнение теплового баланса для изделия, испытываемого на герметичность, перегретым водяным паром

$$G_1 \cdot i_1 + G_3 \cdot C_3 \cdot (t_3 - t_0) = G_3 \cdot C_3 \cdot (t_s - t_3) + G_3 \cdot r + G_3 \cdot (i_2 - i_{\text{Hacnapa}}) + (G_1 + G_3) \cdot i_2, \quad (4.117)$$

где G<sub>1</sub>, G<sub>3</sub> - расход пара и воды, поступающих в изделие, кг/с;

*i*<sub>1</sub> - теплосодержание пара, поступающего в изделие, Дж/кг;



Рисунок 4.12 – Структурная схема модели прогрева изделия, испытываемого на герметичность, перегретым водяным паром  $c_3$  - теплоемкость воды от t = 80 <sup>0</sup>C до  $t_S = 179$  <sup>0</sup>C (по [62]  $c_3 = 1858,94 \text{ Дж/кг}$ .<sup>0</sup>C);

 $t_3$  - температура воды, поступающей в изделие, <sup>0</sup>С;

 $t_0$  - температура таяния льда, равная 0 <sup>0</sup>С;

 $t_S$  – температура насыщения, то есть, температура кипения воды, <sup>0</sup>С (Вода подается в изделие, где давление составляет, например, 1,0 МПа. Для давления 1,0 МПа по диаграмме із для водяного пара определяем, что температура насыщения  $t_S$  = 180 <sup>0</sup>С или более точно по [62]  $t_S$  = 179,04 <sup>0</sup>C);

*r* - теплота парообразования для воды, Дж/кг (при давлении пара в изделии, равном 1,0 МПа, *r* = 2 018,5 КДж/кг [62]);

 $i_2$  - энтальпия водяного пара в изделии при температуре 250 <sup>0</sup>С и давлении 1,0 МПа (определяем по is-диаграмме, что  $i_2 = 2940$  КДж/кг);

 $i_{hac.napa}$  – энтальпия насыщенного пара в изделии при давлении 1,0 МПа и температуре насыщения  $t_S = 179,04$  <sup>0</sup>C (по is-диаграмме  $i_{hac.napa} = 2775$  КДж/кг или по [62] 2777,1 КДж/кг).

Подставив численные значения в соотношение (4.117) получим

 $G_1 \cdot 3,55 \cdot 10^6 + G_3 \cdot 1858,94 \cdot (80 \cdot 0) = G_3 \cdot 1858,94 \cdot (179 \cdot 80) + G_3 \cdot 2,018 \cdot 10^6 + G_3 \cdot (2,94 \cdot 10^6 - 2,78 \cdot 10^6) + (G_1 + G_3) \cdot 2,94 \cdot 10^6$  или  $G_3 = 0,118G_1$ .

Согласно соотношению (4.110)  $G_{0e} = \kappa_{en} G_{0n}$  и

$$\frac{G_{ob}}{G_{on}} \equiv \frac{G_3}{G_1} = \kappa_{on} = 0,118 \tag{4.118}$$

и по выражениям (4.114) получим:

$$\kappa_{2} = \frac{1}{\kappa_{en} + 1} = 0,894;$$

$$\kappa_{4} = \frac{\kappa_{en}}{\kappa_{en} + 1} = 0,105.$$
(4.119)

#### 4.6 Методика анализа технологических и конструктивных параметров газа и устройств испытаний на герметичность изделий как объектов автоматического управления

На современном уровне развития оборудования, технологии и средств автоматизации основными проблемами автоматизации производственных процессов являются:

- математическое моделирование объектов автоматического управления дифференциальными уравнениями, которые характеризуют процессы и устанавливают взаимосвязь между параметрами и

- разработка измерительных преобразователей (датчиков), которые могут воспринимать и измерять контролируемый или регулируемый технологический параметр с заданной точностью.

Математическое моделирование объектов автоматического управления дифференциальными уравнениями со сложными алгебраическими суммами в правой части при управлении технологическими процессами с использованием микропроцессорных устройств и электронных вычислительных машин как раз и является тем необходимым материалом, который используется при управлении по вычисляемым параметрам. Чем больше параметров входит в уравнение, тем больше должно быть точек измерения, а в итоге будет формироваться наиболее правдоподобный сигнал, подаваемый на исполнительный механизм.

Рассмотренные в предыдущих подразделах типовые модели устройств, используемых в системах испытаний на герметичность изделий, их дифференциальные уравнения как объектов автоматического управления, позволяют проектировать и эффективно управлять процессами при испытаниях на герметичность изделий.

С другой стороны, рассмотренные математические модели устройств, используемых в системах испытаний на герметичность изделий, позволяют использовать традиционную методику теории автоматического управления для
анализа систем испытаний на герметичность изделий на стадии их проектирования.

Например, методика определения и построения временных (переходных и импульсных переходных) характеристик, частотных (амплитудночастотных, фазочастотных, амплитуднофазочастотных), логарифмических частотных характеристик или методика применения аналоговых или вычислительных машин для расчетов переходных процессов [77 – 79, 85].

Однако, в теории автоматического управления не достаточно обращается внимание проектировщика объектов автоматического управления на влияние параметров рабочей среды и конструкции этих объектов на постоянные времени и коэффициенты дифференциальных уравнений объектов управления.

В этом подразделе показано в общем виде (без ссылки на конкретный производственный объект) как можно более детально изучить процесс, анализируя взаимосвязь технологических параметров, входящих в коэффициенты и постоянные времени дифференциальных уравнений. Предлагаемая методика анализа влияния параметров газа и устройств испытания рассматривается на примере устройства, содержащего пневматическую емкость и клапаны на входе и выходе газа из емкости, приведенного в подразделе 4.2. Это устройство описывается дифференциальным уравнением (4.32).

На рисунке 4.13 представлены графики зависимости  $\kappa_{c1} = f(P_0)$  устройства, содержащего пневматическую емкость и клапаны, расположенные на входе и выходе газа; кривые 1 – 4 построены для давления после клапана 3 (рисунок 4.3)  $P_{20} = 0.55$ ; 0.65; 0.80 и 1.00 МПа.

На рисунке 4.14 приведены графики зависимости  $k_{c1}$  от давления  $P_{10}$  на входе устройства, содержащего пневматическую емкость и клапаны, расположенные на входе и выходе газа, при заданных значениях давления  $P_0$  в емкости. Кривая 1 построена при  $P_0 = 0,65$  МПа, а кривая 2 при  $P_0 = 0,80$  МПа, при этом давление  $P_{20} = 0,60$  МПа при построении обеих кривых.

Как видно из рисунке 4.13 кривые имеют минимум. Определим этот минимум как  $dk_{cl}/dP_0 = 0$  из соотношения (4.31), преобразовав его к виду

$$k_{c1} = \frac{2P_0P_{10} - P_{10}P_{20} - P_0^2}{2P_0P_{10} - 2P_{10}P_{20} - 2P_0^2 + 2P_0P_{20}};$$

$$\frac{dk_{c1}}{dP_0} = \frac{2(P_0P_{10} - P_{10}P_{20} - P_0^2 + P_0P_{10})(2P_{10} - 2P_0)}{4(P_{10} - P_0)^2(P_0 - P_{10})^2} - \frac{2(P_0P_{10} - P_{10}P_{20})(2P_{10} - 2P_0)}{4(P_{10} - P_0)^2(P_0 - P_{10})^2}$$

$$-\frac{(2P_0P_{10} - P_{10}P_{20} - P_0^2)(2P_{10} - 4P_0 + 2P_{20})}{4(P_{10} - P_0)^2(P_0 - P_{20})^2} = 0.$$



Рисунок 4.13 - График зависимости коэффициента  $k_{c1}$  от давления  $P_0$  при заданных значениях давления  $P_{20}$  на выходе устройства, содержащего пневматическую емкость и клапаны, расположенные на входе и выходе газа

Откуда определяем

$$P_0 = \sqrt{P_{10}P_{20}}$$
 или  $(P_0)_{\min} = \sqrt{P_{10}P_{20}}$ . (4.120)

Проверим по кривой 1 на рисунке 4.13, которая построена при  $P_{20} = 0,55$  МПа и  $P_{10} = 1,2$  МПа. В этом случае

$$(P_0)_{\min} = \sqrt{0.55 \cdot 1.2} = 0.81,$$

которое отмечено на рисунке 4.13 пунктирной вертикальной линией.



Рисунок 4.14 - График зависимости  $k_{c1}$  от давления  $P_{10}$  на входе устройства, содержащего пневматическую емкость и клапаны, расположенные на входе и выходе газа, при заданных значениях давления  $P_0$  в емкости

Для кривой 3 на рисунке 4.13, которая построена при  $P_{20} = 0,80$  МПа и давления  $P_{10} = 1,2$  МПа, получим

$$(P_0)_{\min} = \sqrt{0.80 \cdot 1.2} = 0.98.$$

Если по формуле (4.32) рассматривать изменение давления газа в изделии P от изменения проходного сечения клапана, расположенного на входном трубопроводе изделия  $F_1$ , тогда коэффициент самовыравнивания  $k_{c1} = \kappa_1$  из выражений (4.31).

Определим выражение для коэффициента самовыравнивания  $k_{cl}$  при минимальных значениях  $(P_0)_{min}$  путем подстановки соотношения для минимальных значений  $(P_0)_{min} = P_0 = \sqrt{P_{10}P_{20}}$  в выражение (4.31) для  $\kappa_{cl}$ 

$$(k_{c1})_{\min} = \frac{P_{10} \left( 2\sqrt{P_{10}P_{20}} - P_{20} \right) - P_{10}P_{20}}{2 \left( P_{10} - \sqrt{P_{10}P_{20}} \right) \left( \sqrt{P_{10}P_{20}} - P_{20} \right)} = \frac{1}{1 - \sqrt{P_{20} / P_{10}}} .$$
(4.121)

Проверим правильность полученного соотношения (4.121) по кривой 1 на рисунке 4.13. Для  $P_{20} = 0,55$  МПа и  $P_{10} = 1,20$  МПа минимальное давление

 $(P_0)_{min} = 0,81$ , а минимальное значение коэффициента самовыравнивания по соотношению (4.121)

$$(k_{c1})_{\min} = 1/(1-\sqrt{0.55/1.20}) = 3.12.$$

Координата с точкой при  $(P_0)_{min} = 0,81$  и  $(k_{c1})_{min} = 3,12$  на кривой 1 на рисунке 4.13 отмечена штриховыми линиями.

Если по формуле (4.32) рассматривать изменение давления газа в изделии P от изменения давления газа на входе в изделие  $P_1$ , тогда коэффициент самовыравнивания  $k_{c2} = \kappa_1/\kappa_2$  из выражений (4.31). Производная  $dk_{c2}/dP_0$ 

$$dk_{c2} / dP_{0} = \left(2P_{0}P_{10} - P_{0}^{2} - 2P_{10}P_{20} + P_{0}P_{20}\right) \cdot \left(2P_{10} - 2P_{0}\right) - \left(2P_{0}P_{10} - P_{10}P_{20} - P_{0}^{2}\right) \cdot \left(2P_{10} - 2P_{0} + P_{20}\right) = 4P_{0}P_{10}^{2} - 4P_{10}P_{0}^{2} - 2P_{10}P_{0}^{2} + 2P_{0}^{3} - 4P_{20}P_{10}^{2} + 4P_{0}P_{10}P_{20} + 2P_{0}P_{10}P_{20} - 2P_{20}P_{0}^{2} - (4P_{0}P_{10}^{2} - 4P_{10}P_{0}^{2} + 2P_{0}P_{10}P_{20} - 2P_{20}P_{10}^{2} + 2P_{0}P_{10}P_{20} - P_{10}P_{20}^{2} - 2P_{20}P_{10}^{2} + 2P_{0}P_{10}P_{20} - P_{10}P_{20}^{2} - 2P_{0}P_{10} + P_{10}(P_{10} - P_{20}) = 0.$$

Откуда определяем, что

$$P_{0(1,2)} = P_{10} \pm \sqrt{P_{10} P_{20}},$$

то есть,

$$P_{0(1,2)\min} = P_{10} \pm \sqrt{P_{10} P_{20}} . \qquad (4.122)$$

# 4.7 Обобщение мероприятий по математическому моделированию объектов управления автоматизированных систем испытаний изделий на герметичность

Укрупненная схема мероприятий по математическому моделированию устройств испытаний на герметичность изделий как объектов автоматического управления приведена на рисунке 4.15.

Мероприятия по математическому моделированию устройств систем испытаний на герметичность изделий как объектов автоматического управления

1 Установление типо-2.1 Оценка на стадии проеквых объектов управлетирования динамических свойств объекта систем испытаний ния управления на герметичность издепо параметрам, входящим в коэффициенты лий, их существующего дифференциматематического описаальных уравнений ния и основных управляемых параметров 2.2 Определение экстремальных соотношений пара-Разработка матема-2 метров объекта автоматичетических моделей объского управления по выражеектов автоматического коэффициентов ниям ДЛЯ управления систем исдифференциальных уравнений пытаний по основным управляемым парамет-2.3 Определение параметрам с учетом максиров настройки микропроцесмального количества сорной системы управления влияющих величин И применимых испытаниями, используя ДЛЯ различных конструктивных дифференциальные уравнения исполнений объектов и их коэффициенты управления 3 Разработка программного обеспечения для использования получен-

 ных математических моделей устройств для микропроцессорного управления процессами испытаний на герметичность изделий

<u>чематическому моделированию</u> объектов управления автоматизированных систем испытаний изделий на герметичность

#### 5 МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ГЕРМЕТИЧНОСТИ КЛАПАННЫХ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ИСПЫТА-НИЙ

#### 5.1 Математическое описание воздействия рабочей жидкости на детали сопряжения клапан – седло предохранительных и регулирующих клапанов

Испытания на герметичность изделий, например, железнодорожных цистерн, проводятся водой. В этих условиях используемые предохранительные клапаны, клапанные устройства и регулирующие клапаны управления в системах испытаний на герметичность изделий работают на воде. Кроме этого, в системах испытаний изделий на герметичность широко используются устройства гидроавтоматики, работающие на минеральных маслах.

Из опыта эксплуатации систем испытаний изделий на герметичность известно, что в предохранительных клапанах и клапанных устройствах за небольшие промежутки времени существенно возрастают утечки жидкости в закрытом состоянии и изменяются регулировочные характеристики.

Статистическими исследованиями клапанных устройств, поступающих на ремонтные предприятия, установлено, что основной причиной потери работоспособности предохранительных, перепускных и регулирующих клапанов, работающих в жидкой среде, является износ деталей сопряжений. Детали клапанов подвергаются износу не только от воздействия рабочей жидкости, но и от механических ударов клапана о седло. В результате многократных ударов клапана о седло происходит пластическое деформирование и образование нового микрорельефа. Гидроэрозионный износ и его воздействие уходит как бы на второй план.

Поэтому для проверки возможности возникновения гидроэрозионного износа, существенно влияющего на общий износ деталей сопряжений клапан – седло, проведены теоретические и экспериментальные исследования воздействия рабочей жидкости на детали этого сопряжения.

Сопряжения клапан-седло предохранительных, перепускных и регулирующих клапанов систем испытаний на герметичность представляют собой щели, находящиеся под определенным перепадом давления. Одна из стенок таких щелей – клапан (затвор клапана) обычно совершает периодические знакопеременные движения относительно седла клапана. Имеются режимы работы предохранительных клапанов, например, режим переключения, когда сопряжение затвор-седло находится под перепадом давлений равным нулю и затвор перемещается к седлу в жидкости с определенной скоростью, создавая между деталями сопряжения затвор-седло дополнительные давления жидкости.

Поверхности сопряжений затворов с седлами клапанов, обычно, изготавливаются параллельными. Однако, в процессе эксплуатации поверхности изменяют первоначальную геометрическую форму и сопряжения можно представить как сопрягающиеся две поверхности (две стенки щели), имеющие одна из них или обе выпуклость или вогнутость.

Проведем на основе положений ламинарного течения жидкости, считая рабочую жидкость однородной и изотропной, вывод уравнения давления в щелях с криволинейными выпуклыми или вогнутыми стенками, которые перемещаются возвратно-поступательно с определенной скоростью и ускорением перпендикулярно плоскости щели применительно к предохранительным, перепускным и регулирующим клапанам систем испытаний на герметичность.

Течение вязкой несжимаемой жидкости описывается системой уравнений Навье-Стокса [69] и уравнением неразрывности, которые в векторной форме имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V}\nabla)\mathbf{V} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \operatorname{gradp} + v(\Delta \mathbf{V}), \ div\mathbf{V} = 0, \qquad (5.1)$$

где  $V, F, \rho, v, p, t$  - скорость, массовые силы, плотность, кинематическая вязкость, давление рабочей жидкости и время;

 $\nabla, \Delta, grad p$  - оператор Гамильтона, оператор Лапласа и градиент давления.

Изменение давления рабочей жидкости по длине щели с криволинейной стенкой (рисунок 5.1), движущейся возвратно-поступательно, и находящейся под приложенным к границам щели перепадом давления  $(p_1 - p_0)$ , рассматриваются в работе отдельно для двух вариантов. В первом варианте рассматривается влияние выпуклости или вогнутости одной или обеих стенок щели на распределение давления по длине щели от приложенного перепада давлений  $(p_1 - p_0)$ . В другом варианте рассматривается влияние выпуклости или вогнутости одной или обеих стенок щели на распределение давления по длине щели от приложенного перепада давлений  $(p_1 - p_0)$ . В другом варианте рассматривается влияние выпуклости или вогнутости одной или обоих стенок щели на давление, возникающее в сопряжении клапанседло при движении одной из стенок щели (затвора) перпендикулярно другой стенке (седлу клапана).

При рассмотрении изменения давления по длине щели от перепада давления  $(p_1 - p_0)$  считаем движение рабочей жидкости установившимся, а при рассмотрении влияния скорости движения стенки – неустановившимся. Если пренебречь массовыми силами, плоскопараллельное установившееся без теплообмена движение жидкости, согласно формулам (5.1), описывается следующими уравнениями:

$$\upsilon \frac{\partial \upsilon}{\partial x} + w \frac{\partial \upsilon}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 \upsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \upsilon}{\partial z^2} \right);$$
  
$$\upsilon \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right); \quad \frac{\partial \upsilon}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$
(5.2)

где *v*, *w* - проекции скорости жидкости на ось *x* и *z*.



Рисунок 5.1 - Щель с выпуклой колеблющейся стенкой

Ввиду большого значения радиуса кривизны стенки щели R значениями скорости w и изменениями скорости v по направлению оси x по отношению к скорости v и изменению скорости v по оси z можно пренебречь из-за их малости, то есть,

$$\upsilon >> w, \quad \frac{\partial \upsilon}{\partial z} >> \frac{\partial \upsilon}{\partial x} .$$

На основании принятых допущений уравнения (5.2) принимают вид:

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} = v\frac{\partial^2 v}{\partial z^2},\tag{5.3}$$

$$\frac{\partial \upsilon}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$
 (5.4)

Уравнение неразрывности потока (5.4) остается неизменным ввиду одинакового порядка малости входящих величин.

Зазор h можно выразить через координату x и минимальный зазор s, принимая что закругление одной из стенок происходит по окружности радиуса R,

$$h = s + R - R \cdot \cos \varphi, \qquad (5.5)$$

где  $\varphi$  - угол между осью *ог* и радиусом *R*, проведенным в точку на криволинейной стенке, находящуюся на расстоянии *h* от оси *ох*.

При малых значениях длины щели по сравнению с кривизной стенки значение угла  $\varphi$  можно выразить через отношение x/R.

Разложив функцию Cos(x/R) в ряд Маклорена

$$Cos\frac{x}{R} = 1 - \frac{x^2}{2R^2} + \frac{x^4}{R^4 \cdot 4!} - \frac{x^6}{R^6 \cdot 6!} + \dots$$
(5.6)

и пренебрегая членом  $x^4/(4!R^4)$  и выше как малыми величинами второго порядка, из соотношения (5.5) получим при D = 2R

$$h = s + x^2 / D, \tag{5.7}$$

После интегрирования уравнения (5.3) по *z*, определения постоянных интегрирования из граничных условий  $\upsilon = 0$  при h = 0 и  $h = s + x^2/D$  и замены  $\rho = \mu/v$  получим

$$\upsilon = \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \left[ z^2 - z \left( s + \frac{x^2}{D} \right) \right].$$
 (5.8)

Интеграл от уравнения неразрывности (5.4) можно представить в следующем виде [69]

$$\int_{0}^{z=S+\frac{x^2}{D}} \upsilon \cdot dz = const = C_1.$$
(5.9)

После интегрирования уравнения (5.9), с учетом выражения (5.8), и решения этого уравнения относительно скорости изменения давления получим

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{12\mu \cdot C_1}{\left(s + x^2/D\right)^3}.$$
(5.10)

Изменение давления по длине щели с криволинейной стенкой от приложенного к щели давления  $(p_1 - p_0)$  получим после интегрирования уравнения (5.10) при граничных условиях  $p = p_1$  при x = -m,  $p = p_0$  при x = m в следующем виде

$$p = p_1 - (p_1 - p_0) \frac{\frac{m(5Ds + 3m^2)}{(Ds + m^2)^2} + \frac{x(5Ds + 3x^2)}{(Ds + x^2)^2} + \frac{\pi}{60\sqrt{Ds}} \left( \frac{arctg \frac{m}{\sqrt{Ds}} + arctg \frac{x}{\sqrt{Ds}}}{\sqrt{Ds}} \right)}{\frac{2m(5Ds + 3m^2)}{(Ds + m^2)^2} + \frac{\pi}{30\sqrt{Ds}} arctg \frac{m}{\sqrt{Ds}}}$$
(5.11)

или, обозначив многочлен при  $(p_1 - p_0)$  через A(x),

$$p = p_1 - (p_1 - p_0) \cdot A(x). \tag{5.12}$$

При движении криволинейной выпуклой стенки со скоростью *dh/dt* возвратно-поступательно относительно плоской стенки в щели возникают дополнительные скорости рабочей жидкости и давления. Уравнение Навье - Стокса (5.1) для плоскопараллельного неустановившегося течения жидкости можно представить, пренебрегая как и выше массовыми силами, в следующем виде:

$$\frac{\partial \upsilon}{\partial t} + \upsilon \frac{\partial \upsilon}{\partial x} + w \frac{\partial \upsilon}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \upsilon \left( \frac{\partial^2 \upsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \upsilon}{\partial z^2} \right);$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \upsilon \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \upsilon \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right).$$
(5.13)

Пренебрегая в выражениях (5.13) ввиду малости значением скорости *w* и считая, что скорость *v* является функцией от *x* и *z*, получим

$$\frac{\partial \upsilon}{\partial t} + \upsilon \frac{\partial \upsilon}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \upsilon \left( \frac{\partial^2 \upsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \upsilon}{\partial z^2} \right).$$
(5.14)

Принимая, что изменение скорости жидкости по длине щели от движения стенки имеет параболический характер, с учетом уравнений (5.8) и (5.10), получим

$$\upsilon = -\frac{6C_1}{\left(s + x^2/D\right)^3} \left[ z^2 - z \left(s + \frac{x^2}{D}\right) \right].$$
 (5.15)

Постоянную  $C_1$  можно определить из условия сохранения массы жидкости для щели единичной ширины

$$h \cdot \upsilon_{cp} = -\frac{dh}{dt} x = C_1.$$
(5.16)

Так как 
$$ds/dt = dh/dt$$
, тогда  $\upsilon = \frac{6\mu \cdot x}{\left(s + x^2/D\right)^3} \left[z^2 - z\left(s + \frac{x^2}{D}\right)\right] \frac{ds}{dt}$ . (5.17)

Подставляя значения  $\upsilon$ ,  $\frac{\partial \upsilon}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial^2 \upsilon}{\partial x^2}$ ,  $\frac{\partial \upsilon}{\partial t}$  в формулу (5.14), получим

$$\frac{\partial^{2} \upsilon}{\partial z^{2}} = \frac{1}{\rho \cdot \upsilon} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\upsilon} \cdot \frac{36D^{4}}{(sD + x^{2})^{7}} \left(\frac{ds}{dt}\right)^{2} \left[ \left(D^{3}s - 5D^{2}x^{2}\right)z^{4} + \left(8Dx^{4} + 6D^{2}sx^{2} - 2D^{3}s^{2}\right) \times z^{3} + \left(D^{3}s^{3} - D^{2}s^{2}x^{2} - 5Dsx^{2} - 3x^{6}\right)z^{2} \right] + \frac{6D^{2}x}{\upsilon(sD + x^{2})^{3}} \times \left\{ \frac{d^{2}s}{dt^{2}} \left[ Dz^{2} - \left(Ds + x^{2}\right)z \right] + \left(\frac{ds}{dt}\right)^{2} \frac{D}{(Ds + x^{2})} \left[ (2Ds + 2x^{2})z - 3Dz^{2} \right] \right\} - \frac{12D^{2}x}{(sD + x^{2})^{5}} \frac{ds}{dt} \left[ (15Dx^{2} - 9D^{2}s)z^{2} + 6z(D^{2}s^{2} - x^{4}) \right].$$
(5.18)

После двукратного интегрирования (5.18) по z и, определяя постоянные интегрирования из граничных условий:  $\upsilon = 0$  при z = 0 и  $z = s + x^2/D = h$ , получим формулу для определения скорости рабочей жидкости в щели с колеблющейся стенкой в следующем виде

$$\upsilon = \frac{(z^2 - zh)}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{D^4 x}{v(Ds + x^2)^7} \left(\frac{ds}{dt}\right)^2 \left[\frac{6}{5}D^2 z(Ds - 5x^2)(z^5 - h^5) + \frac{18}{5}Dz \times (8x^4 + 6Dsx^2 - 2D^2s^2)(z^4 - h^4) + 3z(D^3s^3 - D^2s^2x^2 - 5Dsx^4 - 3x^6) \times (z^3 - h^3) \right] + \frac{D^2 x}{v(Ds + x^2)^3} \left\{\frac{d^2s}{dt^2} \left[\frac{Dz(z^3 - h^3)}{2} - z(Ds + x^2)(z^2 - h^2)\right] + 2zD(z^2 - h^2) - \frac{3zD^2(z^3 - h^3)}{2(Ds + x^2)}\right]\right\} - \frac{D^2 x}{(Ds + x^2)^5} \frac{ds}{dt} \times \left[3zD(5x^2 - 9Ds)(z^3 - h^3) + 12z(D^2s^2 - x^4)(z^2 - h^2)\right].$$
(5.19)

На основании уравнений (5.9) и (5.16) можно записать

$$-\frac{ds}{dt}x = \int_{0}^{z=s+x^2/D} \upsilon \cdot dz \,. \tag{5.20}$$

После подстановки скорости из уравнения (5.19) в уравнение (5.20), интегрирования уравнения (5.20) по z и решения полученного выражения относительно  $\partial p / \partial x$  получим

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{6\mu \cdot x(10D^2 + 3Ds + 15x^2)}{5(Ds + x^2)^3} \frac{ds}{dt} + \frac{6\rho Dx}{5(Ds + x^2)} \frac{d^2s}{dt^2} - \frac{3\rho D^2 x(25Ds + x^2)}{35(Ds + x^2)^3} \left(\frac{ds}{dt}\right)^2.$$
 (5.21)

Интегрируя уравнение (5.21) при граничных условиях p = 0 при  $x = \pm m$ , получим

$$p_{A} = \frac{3\mu D}{5} \cdot \frac{ds}{dt} \left[ \frac{5D^{2} + 9Ds + 15m^{2}}{(Ds + m^{2})^{2}} - \frac{5D^{2} + 9Ds + 15x^{2}}{(Ds + x^{2})^{2}} \right] - \frac{3\rho D^{2}}{70} \left( \frac{ds}{dt} \right)^{2} \times \left[ \frac{13Ds + m^{2}}{(Ds + m^{2})^{2}} - \frac{13Ds + x^{2}}{(Ds + x^{2})^{2}} \right] + \frac{3\rho D}{5} \frac{d^{2}s}{dt^{2}} \ln \frac{Ds + x^{2}}{Ds + m^{2}}.$$
(5.22)

Для щелей с плоскими стенками  $D \to \infty$ . Исключая бесконечно малые величины, можно получить, как частный случай, закономерность изменения давления в плоских щелях

$$P_{c} = \left[\frac{6\mu}{s^{3}}\frac{ds}{dt} - \frac{3\rho}{5s}\frac{d^{2}s}{dt^{2}} + \frac{15\rho}{14s^{2}}\left(\frac{ds}{dt}\right)^{2}\right] \cdot \left(x^{2} - m^{2}\right).$$
(5.23)

Уравнение (5.22) применимо также для щелей, образованных двумя выпуклыми поверхностями радиусов  $R_1$  и  $R_2$ . В этом случае приведенный диаметр, который необходимо подставлять в уравнение (5.22), можно определить по соотношению

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{2R_1} + \frac{1}{2R_2}.$$
(5.24)

Представляет практический интерес выяснение изменения давления в щелях, которые образованы плоской и вогнутой стенками (рисунок 5.2). Аналогично уравнению (5.7) для щелей с вогнутыми стенками

$$h = s + \frac{m^2}{D} - \frac{x^2}{D}.$$
 (5.25)

Тогда изменение давления по длине щели, согласно уравнению (5.10), принимает следующий вид

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{12\mu \cdot C_1}{\left(s + \frac{m^2}{D} - \frac{x^2}{D}\right)^3}.$$
(5.26)



Рисунок 5.2 - Щель с вогнутой колеблющейся стенкой

Интегрируя уравнение (5.26) при тех же граничных условиях, что и уравнение (5.10), получим

$$p = p_{1} - (p_{1} - p_{0}) \frac{\frac{2x(5Ds + 5n^{2} - 3x^{2})}{(Ds + m^{2} - x^{2})} + \frac{2m(5Ds + 2m^{2})}{D^{2}s^{2}} + \frac{3}{\sqrt{Ds + m^{2}}} \ln \frac{(\sqrt{Ds + m^{2}} - m)(\sqrt{Ds + m^{2}} - x)}{(\sqrt{Ds + m^{2}} + m)(\sqrt{Ds + m^{2}} + x)}}{\frac{4m(5Ds + 2m^{2})}{D^{2}s^{2}} + \frac{3}{\sqrt{Ds + m^{2}}} \cdot \ln \frac{(\sqrt{Ds + m^{2}} - m)^{2}}{(\sqrt{Ds + m^{2}} + m)^{2}}}$$
(5.27)

или 
$$p = p_1 - (p_1 - p_0) \cdot B(x),$$
 (5.28)

где B(x) - коэффициент при  $(p_1 - p_0)$ .

Для рассматриваемой щели формула (5.8) с учетом выражений (5.17) и (5.26) принимает следующий вид

$$\upsilon = \frac{6\mu x}{\left(s + \frac{m^2}{D} - \frac{x^2}{D}\right)^3} \left[z^2 - z\left(s + \frac{m^2}{D} - \frac{x^2}{D}\right)\right].$$
 (5.29)

После подстановки данной скорости и производных от неё в уравнение (5.15) аналогично вышеизложенной методике, изменение давления в колеблющейся щели с вогнутой стенкой принимает следующую зависимость

$$p_{B} = \frac{3\mu D}{5} \cdot \frac{ds}{dt} \left[ \frac{5D^{2} - 9Ds + 6m^{2}}{D^{2}s^{2}} - \frac{5D^{2} - 9(Ds + m^{2}) + 15x^{2}}{(Ds + m^{2} - x^{2})^{2}} \right] + \frac{3\rho D^{2}}{70} \left( \frac{ds}{dt} \right)^{2} \times \left[ \frac{13(Ds + m^{2})}{(Ds + m^{2} - x^{2})^{2}} - \frac{13Ds + 12m^{2}}{D^{2}s^{2}} \right] + \frac{3\rho D}{5} \cdot \frac{d^{2}s}{dt^{2}} \ln \frac{Ds + m^{2} - x^{2}}{Ds}.$$
 (5.30)

Если щель, по которой протекает рабочая жидкость, состоит из двух вогнутых криволинейных стенок, тогда в уравнение (5.30) вместо *D* необходимо подставить значение приведенного диаметра кривизны поверхностей щели, аналогично уравнению (5.24).

На рисунке 5.3 приведены графики изменения давления рабочей жидкости по длине щели с выпуклой стенкой. Изменение давления от движения одной из стенок показывают кривые 1 и 2: кривая 1 соответствует закрытию, а кривая 2 – открытию щели и построены по формуле (5.22). Кривая 3 соответствует изменению давления по длине щели (l = 2m) от приложенного перепада давления, которая построена по формуле (5.12).

На рисунке 5.4 приведены кривые изменения давления по длине щели с выпуклой стенкой, вычисленного по формуле (5.22), в зависимости от кривизны стенки. Длина щели при построении всех кривых выбиралась равной 0,5 мм (m = 0,25 мм).



1 - изменение давления от движения стенки при закрытии щели; 2 - изменение разрежения от движения стенки при раскрытии щели; 3 - изменение давления от приложенного перепада давлений  $(p_1 - p_0)$ 

Рисунок 5.3 - Изменение давления рабочей жидкости по длине щели с выпуклой стенкой



кривые 1 – 4 - при *R/m*, равном 200, 20, 6 и 2; кривая 5 - для щели с обеими плоскими стенками

Рисунок 5.4 – Изменение давления в щели, образованной плоской и выпуклой стенками, в зависимости от длины и кривизны стенки *R/m* 

Скорость движения стенки, зазор и параметры жидкости оставались постоянными, а изменялась только кривизна стенки R/m. Кривая 1 показывает изменение давления при отношении R/m, равном 200, а кривые 2, 3 и 4 при R/m, равном 20, 6 и 2.

Из этих кривых видна важная закономерность - увеличение радиуса кривизны стенки снижает давление по длине щели. При отношении *R/m*, равном 200, давление в центре щели составляет 12,7 МПа, а при *R/m*, равном 30, 6 и 2 только 6,9; 2,9 и 1,1 МПа.

Кривая 5 построена по формуле (5.23) для щели с плоскими стенками. Давление в центре щели в этом случае равно 13,7 МПа. Кривые 1 и 5 проходят на очень близком расстоянии. Это указывает, что при *R/m*, равном 200, давление по длине щели почти аналогично давлению для щели с плоскими стенками.

Таким образом, если одну стенку закруглить с радиусом, равным половине длины щели, тогда давление в центре щели уменьшается почти в 12 раз (с 12,6 МПа до 1,7 МПа). Аналогичные явления наблюдаются и для щели, образованной плоской и вогнутой стенками. Влияние выпуклости и вогнутости стенок на максимальное давление в центре щели одинаково.

Зависимость давления в сопряжении клапан-седло от высоты подъема движущегося клапана над седлом изображается кривой 1 на рисунке 5.5. Из рисунка видно, что с уменьшением высоты подъема клапана давление в щели воз-

растает. Существенное увеличение давления происходит при высоте, меньшей 0,03 – 0,04 мм

Влияние скорости движения клапана на давление в сопряжении клапан – седло показывает кривая 2 на рисунке 5.5. Зависимость между скоростью движения клапана и давлением в сопряжении линейная. Прямая на этом рисунке построена для длины сопряжения l = 0,2 мм при отношении R/m = 20. Линейная зависимость между давлением и скоростью движения клапана показывает, что влияние второго и третьего членов в уравнениях (5.22) и (5.30) несущественно.

Длина сопряжения клапан-седло оказывает пропорциональное влияние на давление (прямая 3 на рисунке 5.5). По кривой 1 (рисунок 5.5) можно определить скорость изменения давления на единицу перемещения клапана  $\Delta P / \Delta S$ . Это значение для зазоров, меньших 0,02 мм, составляют около 1,65 ·10<sup>-7</sup> МПа/м, а для зазоров, меньших 0,02 мм – около 0,2 · 10<sup>-7</sup> МПа/м.

Влияние скорости движения клапана, согласно прямой 2 (рисунок 5.5), оценивается значением, равным около 400 (м/с)/МПа, при постоянных других параметрах. Скорость нарастания давления от увеличения длины сопряжения, согласно прямой 3 (рисунок 5.5), равна около 1,7 · 10<sup>4</sup> МПа/м.



Рисунок 5.5 – Изменение давления в сопряжении клапан – седло в зависимости от зазора  $\delta$  (кривая 1), скорости движения клапана dS/dt (кривая 2) и длины сопряжения  $L_{\phi}$  (кривая 3)

Зазор в сопряжении клапан-седло при перемещении клапана является таким параметром, влияние которого невозможно существенно уменьшить, так как всегда клапан при работе садится непосредственно на седло для обеспечения необходимой плотности. Уменьшить эффект влияния скорости движения клапана можно путем уменьшения его колебательности. Уменьшение длины сопряжения и увеличение приведенной кривизны деталей оказывает также существенное влияние на давление.

Для уменьшения возможности появления гидроэрозионного износа в клапанах необходимо уменьшать их колебательность (скорость необходимо повышать для увеличения чувствительности клапана), длину сопряжения и приведенную кривизну.

Для предохранительных и перепускных клапанов гидравлических систем испытаний на герметичность изделий расчетным путем, используя аналитические зависимости давления от параметров клапана и рабочей жидкости с учетом предельного давления в сопряжении, установлено, что при длине сопряжения клапан - седло, превышающей 0,25 – 0,30 мм, гидроэрозионный износ становится ведущим видом износа.

Для подтверждения теоретических положений о влиянии параметров предохранительных и перепускных клапанов и рабочей жидкости на работоспособность сопряжений клапан–седло проведены экспериментальные исследования на специальном механическом вибраторе, схема которого приведена на рисунке 5.6. Этот вибратор имитирует работу клапана при колебании в рабочей жидкости в эксплуатационных условиях и исключает удары клапана о седло. Гидромеханический вибратор (рисунок 5.6) содержит гидродвигатель 1 с штоком 4, который совершает возвратно – поступательные движения. К гидродвигателю подводится через штуцер 2 от гидронасоса рабочая жидкость под давлением  $P_1$ . Отвод жидкости производится через штуцер 3. К гидродвигателю посредством переходной втулки 5 крепится корпус вибратора 11.

В корпусе вибратора установлен специальный винт 14 с каналом 13, через который поступает рабочая жидкость от гидронасоса. Винт 14 имеет миллиметровую резьбу и специальную шкалу для точной его установки. На винт 14 с помощью гайки 9 крепится образец 8, который имитирует седло клапана. Клапан (образец с плоской поверхностью) 7 крепится гайкой 6 к штоку 4 гидродвигателя.

Накидная гайка 10 предназначена для фиксации винта 14. После установки образцов 7 и 8 в вибраторе между ними создается минимальный зазор, равный 0,1 мм. При колебании штока 4 гидродвигателя образец (клапан) 7 также совершает возвратно – поступательные движения относительно седла 8, через которое проходит непрерывно рабочая жидкость  $Q_1$ . Давление жидкости при минимальном сближении образцов поддерживалось равным 2,5 МПа.

На рисунке 5.7 (кривая 1) приведена профилограмма поверхности плоского клапана после работы в режиме предохранения с непосредственным соприкосновением клапана с седлом на каждом цикле. Исследования на этом режиме проводились на лабораторной установке для испытаний клапанов в течение 10 часов. Профилограмма 2 на рисунке 5.7 получена при работе плоского клапана с седлом на гидромеханическом вибраторе, когда плоский клапан не соприкасался при колебаниях с седлом. На сопряжение клапан – седло оказывала воздействие только протекающая рабочая жидкость. Исследования в этом режиме для одной пары клапан – седло проводились в течение 10 часов, что соответствует 360 тысячам циклов срабатывания клапана. Профилограмма 2 показывает, что шероховатость поверхности в зоне контакта клапан – жидкость – седло существенно увеличилась (в средней части профилограммы) по сравнению с первоначальной шероховатостью поверхности (по краям профилограммы).



Рисунок 5.6 – Гидромеханический вибратор для исследования клапанов систем испытаний на герметичность изделий

На этом же механическом вибраторе проводились исследования сопряжений клапан–седло с выпуклостью и вогнутостью деталей под воздействием рабочей жидкости без непосредственного контакта клапана с седлом. На рисунке 5.7 кривая 3 показывает шероховатость поверхности плоского клапана, который испытывался с вогнутой фаской, а кривая 4 – с выпуклой фаской. Шероховатость поверхности в обоих случаях изменяется незначительно по сравнению с исходной и намного меньше, чем при плоских поверхностях деталей сопряжения.

Рис 5.7

# 5.2 Теоретический анализ влияния эксцентриситета в сопряжении клапан - седло на работу и гидравлическую плотность предохранительных клапанов

Для выявления влияния эксцентриситета в сопряжении клапан-седло на работу и гидравлическую плотность предохранительных клапанов вначале проведем теоретический анализ. На рисунке 5.8 приведена схема контактирования шарового предохранительного клапана с седлом при наличии эксцентриситета уплотнительных поверхностей. В общем виде на клапан 1 действует сила пружины  $N_{np}$ , H, и равнодействующая сила от давления рабочей жидкости  $N_{xc}$ , H.



Рисунок 5.8 – Схема контактирования шарового предохранительного клапана с седлом при наличии эксцентриситета по ширине фаски седла

Когда  $N_{\mathcal{M}} < N_{np}$ , тогда клапан находится в закрытом состоянии. Когда  $N_{\mathcal{M}} > N_{np}$ , клапан открывается. Однако, последнее неравенство справедливо для случая приложения сил  $N_{\mathcal{M}}$  и  $N_{np}$  по одной и той же линии в вертикальной плоскости. Наличие эксцентриситета уплотнительных поверхностей клапана приводит к смещению точки приложения силы  $N_{np}$  относительно силы  $N_{\mathcal{M}}$  на величину  $0_1 0_2$ .

Приложенная пара сил к клапану приводит к тому, что он начинает открываться не при расчетном давлении, а при некотором эквивалентном давлении  $P_{_{3H}}$ , которое меньше расчетного давления  $P_{_{HUI}}$  начала открытия клапана. Предохранительный клапан начнет открываться тогда, когда реакция  $R_{_{6}}$  (рисунок 5.8) будет равна нулю. Для этого случая сумма моментов сил, Н·м, относительно точки  $A_{_{3}}$  равна

$$N_{np} \cdot A_3 C_5 - N_{\mathcal{H}} \left( A_3 C_5 + C_1 C_2 \right) = 0 , \qquad (5.31)$$

где  $A_3C_5$  - расстояние от точки приложения реакции  $R_a$  в точке  $A_3$  до плоскости, проходящей через центр шарового затвора предохранительного клапана, м;

 $C_1C_2$  - эксцентриситет приложения сил  $R_a$  и  $R_a$ , м. Эксцентриситет определяется по выражению

$$C_1 C_2 = 0,5 \, d_c - r_{us} \sin(\alpha_1 - \alpha_0), \tag{5.32}$$

где  $d_{c_{c}}r_{u}$  – диаметр седла и радиус шарового затвора предохранительного клапана, м;

*α*<sub>1</sub> – половина угла между радиусами, опирающимися на наибольший диаметр фаски седла клапана, градусов;

*α*<sub>0</sub> - угол между радиусами, опирающимися на наибольшую ширину фаски седла клапана, градусов.

Учитывая, что:

$$A_{3}C_{5} = r_{u} \sin\left(\alpha_{1} - \frac{\alpha_{0}}{2}\right);$$

$$N_{\mathcal{H}} = P_{\mathcal{H}} \frac{\pi d_{c}^{2}}{4};$$
(5.33)

$$N_{np} = P_{HM} \frac{\pi d_c^2}{4},$$

давление жидкости, соответствующее началу открытия предохранительного клапана при наличии эксцентриситета уплотнительных поверхностей  $P_{_{3H}}$ , определяется выражением

$$P_{_{\mathcal{H}\mathcal{H}}} = \frac{P_{_{\mathcal{H}\mathcal{U}}} \sin (\alpha_1 - \alpha_0 / 2)}{\sin (\alpha_1 - \alpha_0 / 2) + d_c / 2r_{_{\mathcal{U}}} - \sin (\alpha_1 - \alpha_0)}, \quad (5.34)$$

где

$$\alpha_0 = 180 \ S / \pi r_{uu} \ ; \tag{5.35}$$

$$\alpha_1 = \frac{90 \ \vartheta_{\phi}}{\pi r_{u}} + \arcsin \quad \frac{d_0}{2 r_u \cos \left(90 \ \vartheta_{\phi} / \pi r_u\right)}, \qquad (5.36)$$

где *P*<sub>нш</sub>, *P*<sub>эн</sub> – расчетное и эквивалентное давление рабочей жидкости, при котором открывается предохранительный клапан при наличии на седле эксцентриситета, МПа;

 $S_{\delta}$ ,  $\mathcal{F}_{\phi}$  -наибольшая ширина и эксцентриситет фаски седла клапана, м.

Для момента полного открытия клапана можно составить следующее уравнение сил вокруг точки В<sub>2</sub> (для отхода затвора от седла в точке A<sub>3</sub>)

$$N_{\mathcal{H}} \left( B_2 C_3 - C_1 C_2 \right) = N_{np} B_2 C_3, \qquad (5.37)$$

где 
$$B_2 C_3 = r_{u} \sin \beta; \beta = \alpha_1 - \beta_0 / 2; \beta_0 = 180 S_{M} / \pi r_{u}$$
 (5.38)

Давление  $P_{_{3\kappa}}$ , МПа, при котором предохранительный клапан полностью отрывается от седла согласно уравнениям (5.33) и (5.37), определяется выражением

$$P_{_{\mathcal{H}\mathcal{U}}} = \frac{P_{_{\mathcal{H}\mathcal{U}}}\sin\beta}{\sin\beta - d_c/2r_{_{\mathcal{U}}} + \sin(\alpha_1 - \alpha_0)}.$$
(5.39)

Формулы (5.34) и (5.39) представим в виде:

$$P_{\mathcal{H}} = k_{peh} P_{Hu}; \qquad (5.40)$$

$$P_{_{\mathcal{H}\mathcal{K}}} = k_{pe\kappa} P_{_{\mathcal{H}\mathcal{U}}}, \qquad (5.41)$$

где  $k_{peh}$  - коэффициент уменьшения давления начала открытия предохранительного клапана с эксцентриситетом уплотнительных поверхностей

$$k_{p_{3\kappa}} = \frac{\sin(\alpha_1 - 0.5\alpha_0)}{\sin(\alpha_1 - 0.5\alpha_0) + 0.5d_c / r_u - \sin(\alpha_1 - \alpha_0)}; \quad (5.42)$$

 $k_{p_{3\kappa}}$  – коэффициент повышения давления для полного отхода предохранительного клапана от седла

$$k_{p_{\mathcal{F}}} = \frac{\sin \beta}{\sin \beta - 0.5d_c / r_u + \sin(\alpha_1 - \alpha_0)}.$$
 (5.43)

На рисунке 5.9 приведена зависимость коэффициента уменьшения давления  $k_{p_{3H}}$  от эксцентриситета  $\mathcal{F}_{\phi}$  уплотнительных поверхностей предохранительного клапана. Этот график построен по формуле (5.42). Максимальное значение коэффициента равно единице при эксцентриситете уплотнительных поверхностей  $\mathcal{F}_{\phi} = 0$ . Увеличение эксцентриситета, например, до 0,5 мм уменьшает значение коэффициента  $k_{p_{3H}}$  до 0,89.



Рисунок 5.9 – Зависимости коэффициентов уменьшения давления начала открытия  $\kappa_{peh}$  и повышения давления  $\kappa_{pe\kappa}$  предохранительного клапана от эксцентриситета уплотнительных поверхностей

В этом случае, согласно выражению (5.40), предохранительный клапан начнет открываться при давлении в гидросистем, равном 8,9 МПа, а не при расчетном давлении 10,0 МПа. На этом же рисунке приведена зависимость коэффициента повышения давления  $k_{pэк}$  для полного отхода клапана от эксцентриситета  $\mathcal{P}_{\phi}$ , которая построена по формуле (5.43). Минимальное значение  $k_{pэк}$  равно единице. Увеличение эксцентриситета фаски седла приводит к росту коэффициента  $k_{pэк}$ . Например, при  $k_{pэк} = 1,08$  согласно формуле (5.41) клапан полностью отойдет от седла только при давлении в гидросистеме 10,8 МПа. В интервале давлений от расчетного, равного 10 МПа, до 10,8 МПа клапан будет одной какой-то частью соприкасаться с седлом. 5.3 Экспериментальные исследования влияния эксцентриситета в сопряжении клапан-седло на работу и гидравлическую плотность предохранительных клапанов

Теоретические положения о существенном влиянии эксцентриситета фаски седла (уплотнительных поверхностей) предохранительных клапанов подтверждены экспериментальными данными. На рисунке 5.10 приведены графики утечек жидкости через предохранительный клапан в зависимости от давления для различных эксцентриситетов фаски седла.



Рисунок 5.10 – Зависимость утечек рабочей жидкости через предохранительный клапан от давления в гидравлической системе и эксцентриситета фаски седла: кривые 1- 4 соответствуют эксцентриситетам 0,00; 0,15; 0,34; 0,76 мм

Эксцентриситет фаски седла специально формировался перед установкой его в клапан. Кривая 1 (рисунок 5.10) относится к предохранительному клапану, фаска седла которого была острой и эксцентриситет близок к нулю. Кривые 2, 3 и 4 получены при исследовании клапанов, эксцентриситет фаски седла которых равнялся 0,15; 0,34 и 0,76 мм. Из полученных данных видно, что увеличение эксцентриситета фаски седла уменьшает наклон кривых утечек жидкости, существенно увеличивая утечки рабочей жидкости через предохранительный клапан.

По экспериментальным данным определены давления в гидравлической системе, при которых предохранительный клапан начинает открываться. Для этого по кривым 1 - 4 (рисунок 5.10) и по формуле (2.56) построены графики относительного зазора в сопряжении клапан – седло в зависимости от давления в гидравлической системе и эксцентриситета фаски седла, то есть, кривые  $n_{u_{3uu}} = f(P_1, \mathcal{P}_d)$  (кривые 1- 4 на рисунке 5.11).

Кривые 1, 2, 3 и 4 относятся к предохранительным клапанам, у которых эксцентриситеты фаски седла равны 0; 0,15; 0,34 и 0,76 мм. Кривая 5 (рисунок 5.11) характеризует теоретическую работу клапана. Согласно кривой 5 клапан находится в закрытом положении до давления 10,5 МПа, а при давлении несколько большем 10,5 МПа клапан резко поднимается. Открытие реального предохранительного клапана даже с нулевым эксцентриситетом происходит более плавно по кривой 1 (рисунок 5.11).



кривые 1 – 4 построены по кривым 1 – 4 из рисунка 5.10; кривая 5 построена по теоретическим утечкам

Рисунок 5.11 – Зависимость относительного зазора (износа) в сопряжении предохранительный клапан – седло от давления в гидравлической системе и эксцентриситета

Давление начала открытия предохранительного клапана определялось путем проведения двух касательных, как показано на рисунке 5.11. Точки пересечения касательных, принятые за давления начала открытия предохранительного клапана, для кривых 1 - 4 равны 10,1; 9,9; 9,4 и 8,3 МПа. По этим значениям давления и соответствующим эксцентриситетам фаски седла предохранительных клапанов построена прямая 3 на рисунке 5.12.

На этом же рисунке построена теоретическая прямая 1 по формуле (5.40). Значение коэффициента  $\kappa_{p_{3H}}$  выбиралось по графику (рисунок 5.9) в зависимости от эксцентриситета уплотнительных поверхностей.

Теоретическая 1 и экспериментальная 3 зависимости (рисунок 5.12) являются прямыми линиями и проходят почти параллельно одна другой, но сдвинуты по оси давления на 0,25 МПа. Прямая 2 показывает давление полного срабатывания клапанного устройства, которое равно 13,5 МПа. Из рисунка 5.12 можно установить, что при настройке клапанного устройства на 13,5 МПа, предохранительный клапан с нулевым эксцентриситетом фаски седла начинает открываться при давлении 10,2 МПа.

Если же эксцентриситет фаски седла равен, например, 0,4 мм, тогда предохранительный клапан открывается при давлении 9,3 МПа. В общем виде по

данным рисунка 5.12 представляется возможным составить соотношения между давлением начала открытия предохранительного клапана и эксцентриситетом фаски седла.



1, 3 – теоретическая и экспериментальная зависимость; 2 – давление в системе автоматизации, поддерживаемое клапанным устройством при его срабатывании и с нулевым эксцентриситетом в сопряжении клапан - седло

Рисунок 5.12 – Зависимость давления начала открытия предохранительного клапана от эксцентриситета в сопряжении клапан – седло

Теоретическая зависимость начала открытия предохранительного клапана  $P_{m_{2H}}$ , МПа, от эксцентриситета уплотнительных поверхностей

$$P_{m_{\mathcal{H}}} = P_{\mathcal{H}\mathcal{U}} - \mathcal{F}_{\phi} dP_{\mathcal{H}\mathcal{U}}^{1} / d\mathcal{F}_{\phi} , \qquad (5.44)$$

где  $dP_{\mu\mu}^{l}/d\Theta_{\phi}$  - теоретическая скорость изменения давления начала открытия предохранительного клапана от эксцентриситета фаски седла, которая согласно прямой 1 (рисунок 5.12) равна 2,2 МПа/мм.

Фактическое давление начала открытия предохранительного клапана при наличии эксцентриситета  $P_{d_{3H}}$ , МПа, выражается соотношением

$$P_{\phi \ni H} = P_{H u} - \mathcal{P}_{\phi} dP_{H u} / d\mathcal{P}_{\phi} , \qquad (5.45)$$

где  $dP_{\mu\mu}/d\Theta_{\phi}$  – фактическая скорость изменения давления начала открытия предохранительного клапана от эксцентриситета фаски седла, которая согласно экспериментальной кривой 3 (рисунок 5.12)  $dP_{\mu\mu}/d\Theta_{\phi} = 2,5$  МПа/мм.

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили установить влияние эксцентриситета на герметичность сопряжения клапан-седло, на давление начала открытия предохранительного клапана и пологость кривых утечек рабочей жидкости в зависимости от давления в гидравлической системе испытаний.

## 5.4 Теоретические положения о влиянии упругой емкости на работу клапанов гидравлических систем

Наряду с увеличением ресурса герметичности клапанов к ним предъявляются особые требования по качеству работы. При срабатывании, например, клапанного устройства, содержащего предохранительный и перепускной клапаны, которое настроено на давление 13<sup>+1</sup> МПа, в гидравлической системе появляются забросы давления, достигающие 16 - 19 МПа.

О неудовлетворительном качестве срабатывания аналогичных по конструкции клапанов отмечает Т.М. Башта [61]. Он указывает, что критерием качества работы клапанных устройств должен быть минимум конечного давления при их срабатывании и давление в гидравлической системе при срабатывании клапанного устройства не должно превышать 4 - 5 % давления настройки. Достичь этого, отмечает автор [61], необходимо любым доступным методом.

Используя электропневматические аналогии установлено, что для улучшения качества срабатывания клапанных устройств гидравлических систем испытаний на герметичность изделий и увеличения ресурса герметичности предохранительных и перепускных клапанов целесообразно к камере за перепускным клапаном подключать упругую емкость [86]. На рисунке 5.13 приведена схема клапанного устройства гидравлических систем испытаний на герметичность с подключенной упругой емкостью. Ниже приводятся теоретические и экспериментальные исследования влияния упругой емкости на работу как перепускного, так и предохранительного клапанов клапанного устройства.



1 - перепускной клапан, 2 - предохранительный клапан, 3 - упругая ем-кость, 4 - трубопровод, А - камера входного давления, В – камера управления

Рисунок 5.13 - Схема клапанного устройства гидравлических систем испытаний на герметичность изделий с предохранительным и перепускным клапанами и упругой емкостью

Клапанное устройство содержит перепускной клапан 1 с конусным затвором, в поршне которого выполнено дроссельное отверстие d<sub>4</sub>, предохранительный клапан с шаровым затвором 2, упругую емкость 3, трубопровод подвода рабочей жидкости 4 и выходной трубопровод, который подсоединяется к полости клапанного устройства ниже конусного затвора перепускного клапана.

Перепускной клапан 1 имеет поршень и хвостовик. Поршень клапана перемещается в корпусе устройства, а хвостовик клапана расположен в специальной втулке, расположенной в корпусе. Наружный диаметр хвостовика и внутренний диаметр втулки собраны с использованием селективной сборки с высокой точностью. Зазор между этими поверхностями составляет около 50 мкм.

Движения предохранительного и перепускного клапанов даже без упругой емкости, описываются нелинейными дифференциальными уравнениями с правой частью, которые не решаются аналитически обычными способами.

Введение упругой емкости в конструкцию клапанного устройства еще более усложняет задачу. Поэтому теоретический анализ влияния упругой ем-

кости на работу клапанного устройства проводится отдельно для перепускного и предохранительного клапанов, в общем виде, без учета присоединенных трубопроводов.

Вначале принимаем, что предохранительный клапан полностью поджат к седлу и в работе не участвует, а функционирует только перепускной клапан, имеющий воспринимающие давление рабочей жидкости площади  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ .  $\Omega_1$  - площадь, воспринимающая входное давление и определяемая диаметрами  $d_2$  и  $d_3$ , а  $\Omega_2$  – площадь, воспринимающая давление со стороны упругой емкости и определяемая диаметрами  $d_2$  и  $d_1$ .Обычно в клапанах данного типа  $\Omega_1 < \Omega_2$ .

При этих допущениях перепускной клапан работает как предохранительный клапан, затвор которого поджимается к седлу пружиной, переменным давлением от упругой емкости и разностью давлений, приложенной к поршню перепускного клапана.

Уравнение динамики перепускного клапана принимаем на основе уравнения динамики золотника, нагруженного с одной стороны давлением рабочей жидкости, а с другой стороны - пружиной [87]

$$M_{3} \frac{d^{2}h_{3}(t)}{dt^{2}} + C_{f_{3}} \frac{dh_{3}(t)}{dt} + c_{np_{3}}h_{3}(t) = p_{3}(t)\Omega_{3}, \qquad (5.46)$$

где *М*<sub>3</sub> – приведенная масса подвижных частей золотника, кг;

 $h_{3}(t)$  - смещение золотника от начального положения, м;

 $C_{f_3}$  – коэффициент жидкостного трения между золотником и корпусом при движении золотника, H·c/м;

 $C_{np3}$  - жесткость пружины золотника, Н/м;

 $p_{3}(t)$  – давление рабочей жидкости, которое действует по торцу золотника, МПа;

 $\Omega_3$  – площадь поперечного сечения золотника, м<sup>2</sup>;

*t* – время перемещения золотника, с.

При учете разности давлений, приложенной к перепускному клапану, его движение можно записать аналогично уравнению (5.46) в следующем виде

$$M\frac{d^{2}h(t)}{dt^{2}} + C_{f}\frac{dh(t)}{dt} + c_{np}h(t) = p_{1}(t)\Omega_{1} - p_{2}(t)\Omega_{2}, \qquad (5.47)$$

где М – приведенная масса подвижных частей клапана, кг;

h(t) -перемещение перепускного клапана относительно седла, м;

*C<sub>f</sub>* – коэффициент жидкостного трения между поверхностями хвостовика перепускного клапана и втулкой при движении клапана, H·c/м;

 $C_{np}$  - жесткость пружины перепускного клапана, Н/м;

 $p_1(t), p_2(t)$  – давление рабочей жидкости в камерах А и В, МПа;

*t* – время перемещения клапана, с.

После преобразования по Лапласу уравнение (5.47) принимает вид

$$(T_1^2 s^2 + 2\xi T_1 s + 1)h(s) = p_1(s)\Omega_1 - p_2(s)\Omega_2,$$
 (5.48)

где  $T_{l}$  – постоянная времени, с, и  $\xi$  - коэффициент демпфирования:

$$T_1 = \sqrt{M/c_{np}}, \quad \xi = C_f / 2\sqrt{c_{np}M}.$$
 (5.49)

Принимаем, что упругая емкость, присоединенная к клапанному устройству, линейна, то есть,

$$C_b = Q/p_2 = const, \tag{5.50}$$

где  $C_b$  - постоянная упругой емкости, м<sup>3</sup>/Па;

*Q* - количество рабочей жидкости, м<sup>3</sup>, поглощаемой упругой емкостью.

При установившемся течении рабочей жидкости через клапан, количество жидкости в упругой емкости

$$Q_0 = p_0 \cdot C_b.$$

Если давление в камере A станет равным  $p_1$ , тогда за время dt в камеру B поступит объем рабочей жидкости dQ(t), давление изменится на величину  $dp_2(t)$  и  $[p_0 + dp_2(t)]Cb = Q_0 + dQ(t)$ . Вычитая из этого выражения предыдущее соотношение, получим

$$dp_2(t) \cdot C_b = dQ(t). \tag{5.51}$$

С другой стороны, количество рабочей жидкости, поступающей в упругую емкость через дроссельное отверстие в поршне перепускного клапана для докритического режима течения [61], определяется выражением

$$dQ = \varepsilon \frac{[p_1(t) - p_2(t)]d_4^4}{\mu \cdot l_2} dt, \qquad (5.52)$$

где *є* – коэффициент расхода;

 $d_4$  – диаметр дроссельного отверстия в поршне клапана, м;

 $l_2$  – длина дроссельного отверстия, м;

 $\mu$  – динамическая вязкость рабочей жидкости, Па·с.

Приравнивая уравнения (5.51) и (5.52), получим

$$T_2 \frac{dp_2(t)}{dt} + p_2(t) = p_1(t),$$

где  $T_2$  - постоянная времени,  $T_2 = \frac{C_b \cdot \mu \cdot l_2}{\varepsilon \cdot d_4^4}$ .

Предыдущее дифференциальное уравнение после преобразования в операторную форму принимает вид

$$p_2(s) = \frac{b}{s+b} p_1(s), \qquad (5.53)$$

где b - частота, равная обратной величине от постоянной времени, то есть,  $b=1/T_2$ .

На затвор перепускного клапана действует разность давлений  $\Delta_p(t)$ 

$$\Delta_p(t) = P_1(t) - P_2(t).$$
(5.54)

После преобразования по Лапласу выражения (5.54) и подстановки его в (5.53), получим дифференциальное уравнение

$$\frac{d\Delta_p(t)}{dt} + b\Delta_p(t) = \frac{dp_1(t)}{dt},$$
(5.55)

связывающее перепад давлений на поршне перепускного клапана с входным давлением. Из этого уравнения следует, что с введением упругой емкости появляется перепад давления  $\Delta_p(t)$  на поршне перепускного клапана, который пропорционален производной от входного давления  $dp_1(t)/dt$ .

После подстановки выражения (5.53) в (5.48) получим

$$\left(T_1^2 s^2 + 2\xi T_1 s + 1\right) h(s) = \frac{\Omega_1 \left[s + b(1 - k_1)\right]}{(s + b)} p_1(s), \qquad (5.56)$$

где  $k_1$  – коэффициент площадей поршня перепускного клапана, воспринимающих давления  $P_1(t)$  и  $P_2(t)$ ,  $k_1 = \Omega_2/\Omega_1$ .

Определим значения постоянных времени  $T_1$  и  $T_2$  и коэффициента демпфирования  $\xi$ . Для этого определим вначале коэффициент жидкостного трения  $C_f$ , H·c/м, движущегося хвостовика перепускного клапана во втулке, по формуле [78]

$$C_f = \mu_{\scriptscriptstyle M} \pi d_{x_{\scriptscriptstyle B}} l_l / \delta,$$

где  $\mu_{M}$  – динамическая вязкость рабочей жидкости (для минерального масла [61]  $\mu_{M} = 0,0282 \text{ H} \cdot \text{c/m}^2$ );

 $d_{x_{6}}$  – диаметр хвостовика перепускного клапана, м ( $d_{x_{6}}$ = 20·10<sup>-3</sup> м);

 $l_1$  – длина хвостовика клапана, находящаяся в сопряжении со втулкой, м ( $l_1 = 30 \cdot 10^{-3}$  м);

 $\delta$  - зазор между наружной поверхностью хвостовика и внутрение поверхностью втулки, м ( $\delta = 50 \cdot 10^{-6}$  м).

Коэффициент жидкостного трения, движущегося хвостовика перепускного клапана во втулке  $C_f = 28,2 \cdot 10^{-3} \pi \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 10^{-3}/50 \cdot 10^{-6} = 1,0625$  H·c/м.

Жесткость пружины перепускного клапана обычно существенно меньше жесткости пружин предохранительных клапанов прямого действия и не превышает  $c_{np} = 1250$  H/м.

Масса перепускного клапана - 0,2 кг. При этих значениях величин получим  $T_1 = \sqrt{M/c_{np}} = 0,0126$  с;  $\xi = C_f/2\sqrt{c_{np}M} = 0,0336$ .

Постоянная времени  $T_2 = C_b \cdot \mu \cdot l_2 / \varepsilon \cdot d_4^4 = 0,481$  с при следующих значениях величин: коэффициент расхода [61]  $\varepsilon = 0,75$ ; диаметр дроссельного отверстия в поршне клапана  $d_4 = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м; длина дроссельного отверстия  $l_2 = 10 \cdot 10^{-3}$  м; динамическая вязкость рабочей жидкости (минерального масла) [61]  $\mu = 0,0282$  H·c/m<sup>2</sup>; постоянная упругой емкости (определенная экспериментально для металлических сильфонов)  $C_b = 5 \cdot 10^{-7}$ , м<sup>3</sup>/Па.

Таким образом, в уравнении (5.56) коэффициент демпфирования ξ = 0,0336. Переходная функция для перепускного клапана при единичном возмущении по давлению после обратного преобразования по Лапласу принимает вид

$$h(t) = \frac{k_1}{b^2 + \sigma^2 - 2nb} \left[ e^{-nt} \left( \frac{b - n}{\omega} \sin \omega t - \cos \omega t \right) + e^{-bt} \right] + \frac{a \left(1 - k_1\right)}{\sigma^2} \left[ 1 - e^{-nt} \left( \cos \omega t - \frac{n}{\omega} \sin \omega t \right) \right], \quad (5.57)$$

где  $\omega = \sqrt{\sigma^2 - n^2}$  при условии  $\sigma^2 > n^2$ ;  $n = \xi/T_1$ ;  $\sigma = 1/T_1$ ;  $a = \Omega_1/T_1^2$ .

На рисунке 5.14 приведены графики переходного процесса для перепускного клапана при единичном возмущении по давлению (при полностью закрытом предохранительном клапане) при значениях:  $T_1 = 0,0126$  с;  $\xi = 0,0336$ ;  $T_2 = 0,481$  с; n = 2,67 с<sup>-1</sup>;  $\sigma = 79,3$  с<sup>-1</sup>;  $\omega = 79,3$  радиан/с;  $\kappa_1 = 1,0$  и  $\kappa_1 = 0,9$ ;  $b = 0,1 \omega$ ;  $b = \omega$  и  $b = 10 \omega$ . При коэффициенте площади k = 1,0, то есть когда  $\Omega_l = \Omega_2$ , с увеличением величины b, что соответствует уменьшению постоянной времени клапана с упругой емкостью (это происходит при уменьшении объема упругой емкости), значение открытия клапана (кривые 1, 2, 3, 4) уменьшается.

При  $b = 10\omega$  клапан почти не реагирует на изменение давления. Это означает, что при работе клапанного устройства без упругой емкости перепускной клапан не может открыться и предохранить систему до тех пор, пока не откроется предохранительный клапан.

В клапанном устройстве с упругой емкостью можно получить значительные открытия затвора перепускного клапана до открытия затвора предохранительного клапана путем изменения характеристик как емкости, так и дроссельного отверстия.

При коэффициенте площади k = 0,9, когда  $\Omega_2 > \Omega_{I_1}$  кривые переходного процесса 5 и 6 (рисунок 5.14) сдвигаются вниз, причем, чем больше величина b, тем смещение более значительное. Из этих кривых видно, что даже при отрицательном коэффициенте площадей возможно открытие перепускного клапана до открытия предохранительного клапана.



1 - при b = 0 и k = 1,0;  $2 - b = 0,1\omega$ , k = 1,0;  $3 - b = \omega$ , k = 1,0; 4 $b = 10\omega$ , k = 1,0;  $5 - b = 0,1\omega$ , k = 0,9;  $6 - b = 1,0\omega$ , k = 0,9

Рисунок 5.14 - Перемещение затвора перепускного клапана с упругой емкостью и закрытом предохранительном клапане при единичном возмущении по давлению, равном 10 МПа

Для выяснения влияния упругой емкости на работу предохранительного клапана клапанного устройства принимаем, что перепускной клапан закрыт полностью и при изменении давления в системе не открывается.

Уравнение движения предохранительного клапана прямого действия, приведенного на рисунке 5.13, составим на основании формулы (5.47), учитывая, что на его затвор действует давление  $p_2$ , а коэффициент демпфирования n = 0,

$$m\frac{d^{2}h_{u}(t)}{dt^{2}} + c_{u.np}h_{u}(t) = p_{2}(t)F_{u}, \qquad (5.58)$$

где *m* – приведенная масса подвижных частей предохранительного клапана, кг;

 $h_{ul}(t)$  - перемещение шарового затвора предохранительного клапана относительно седла, м;

*с*<sub>*шпр*</sub> - жесткость пружины клапана, Н/м;

 $p_2(t)$  - давление рабочей жидкости в камере перед предохранительным клапаном, МПа;

 $F_{u}$  - площадь сечения седла клапана, м<sup>2</sup>.

С учетом выражения (5.53) уравнение движения предохранительного клапана, после преобразования по Лапласу, принимает вид

$$(T_{u}^{2}s^{2} + 1)h_{u}(s) = \frac{b}{s+b}p_{1}(s)F_{u}, \qquad (5.59)$$

где  $T_{u}$  – постоянная времени предохранительного клапана.  $T_{u} = \sqrt{m/c_{unp}}$ .

Переходная функция для предохранительного клапана при единичном возмущении по давлению по выражению (5.59) после обратного преобразования по Лапласу принимает вид при  $a_{\mu} = F_{\mu}/T_{\mu}^2$ 

$$h(t) = a_{uu} \left[ \frac{1}{b\sigma^2} - \frac{1}{b(b^2 + \sigma^2)} e^{-bt} - \frac{1}{\sigma^2(b^2 + \sigma^2)} (b \cdot \cos\sigma t + \sigma \cdot \sin\sigma t) \right].$$
(5.60)

По этому выражению при  $\sigma = 100,0$  и коэффициенте *b*, равном 0,2 $\sigma$ ; 0,5 $\sigma$  и *b* =  $\sigma$ , построены кривые переходного процесса для предохранительного клапана (рисунок 5.15).

Из этого рисунка следует, что при изменении постоянной *b*, то есть, при изменении параметров упругой емкости и дроссельного отверстия, можно получить более плавный подъем предохранительного клапана к установившемуся значению. Амплитуда колебания затвора клапана при этом также уменьшается.

Из теоретических положений вытекает, что с подключением упругой емкости к клапанному устройству гидравлических систем испытаний на герметичность происходит введение сигнала по производной от входного давления к перепускному клапану.

В результате этого перепускной клапан самостоятельно открываться до открытия предохранительного клапана. В работе предохранительного клапана клапанного устройства с упругой емкостью отмечается уменьшение амплитуды колебаний. Теоретические исследования клапанного устройства с упругой

емкостью показывают, что забросы давления в гидравлической системе при срабатывании клапанного устройства должны существенно понижаться.



1 - при  $b = \sigma$ ;  $2 - b = 0,5\sigma$ ;  $3 - b = 0,2\sigma$ 

Рисунок 5.15 – Движение предохранительного клапана при единичном возмущении по давлению

Для подтверждения теоретических положений о влиянии упругой емкости, присоединенной к клапанному устройству гидравлических систем испытаний, проведены экспериментальные исследования.

### 5.5 Установка для ресурсных испытаний на герметичность клапанов гидравлических систем

Для проведения ресурсных испытаний клапанов гидравлических систем на герметичность использовалась специально разработанная и изготовленная установка. Общий вид установки приведен на рисунке 5.16, а гидравлическая схема - на рисунке 5.17. Установка позволяет имитировать реальные условия работы предохранительных и перепускных клапанов гидравлических систем испытаний и составлять различные гидравлические схемы для исследования клапанов.

Гидравлическая схема установки (рисунок 5.17) содержит гидронасос 3 с электродвигателем 2, специальные блоки для установки перепускных и предохранительных клапанов 6 и 7, электрогидравлический золотниковый распределитель 8, который включаются и выключаются по заданной программе от программного устройства, фильтр 9 и охладитель 10 с автоматическим регулированием температуры.

Плавное увеличение давления в гидравлической системе установки производится с помощью дросселя 4-1, совместно с которым установлен предохранительный клапан 4-2, предохраняющий от аварийного повышения давления и поломок установки.



Рисунок 5.16 - Общий вид установки для ресурсных исследований герметичности предохранительных и перепускных клапанов гидравлических систем испытаний

Предохранительный клапан 6-3, аналогичный клапану 6-2, настраивается совместно с перепускным клапаном 6-1 и подключается только при определении утечек рабочей жидкости через сопряжения перепускного клапана после определенного числа срабатываний. Этим исключается влияние изменения настройки клапана 6-2 от его износа на работу перепускного клапана. Ниже клапан 6-3 именуется эталонным предохранительным клапаном для измерения утечек жидкости.

Работа установки – циклическая. Длительность цикла может изменяться от 2 до 60 с. Электрическая схема установки содержит средства управления электродвигателем гидронасоса и гидравлическими гидрораспределителями с электромагнитными приводами, средства учета количества срабатываний клапанов, времени работы установки под нагрузкой, времени измерения утечек рабочей жидкости, а также устройства выключающие установку при разрыве рукавов высокого давления, появлении утечек рабочей жидкости, повышении температуры рабочей жидкости выше установленного предела, при перегрузке электродвигателя гидронасоса и изменении установленной длительности цикла работы установки.


1 – расходный бак рабочей жидкости; 2 – электродвигатель; 3 – гидронасос; 4 – блок гидравлический: 4 – 1 – дроссель; 4 – 2 – предохранительный клапан; 5 – манометр; 6, 7 – специальный блок: 6-1, 7-1 перепускной клапан, 6-2, 6-3, 7-2 – предохранительный клапан, 6-4 – дроссель; 8 – электрогидравлический распределитель; 9 – фильтр; 10 – охладитель; 11 – 19 – трубопроводы

Рисунок 5.17 - Гидравлическая схема установки для экспериментальных исследований герметичности предохранительных и перепускных клапанов систем испытаний

## 5.6 Экспериментальные исследования влияния упругой емкости на работу клапанов гидравлических систем

Экспериментальные исследования влияния упругой емкости на работу перепускного и предохранительного клапанов клапанных устройств гидравлических систем испытаний проводились для подтверждения теоретических положений путем осциллографирования давлений в различных точках гидросистемы.

При осциллографировании использовались проволочные тензодатчики сопротивления, наклеенные на цилиндрические стаканы, усилители типа УН8 – 8 и осциллограф типа Н-700. В качестве упругой емкости применялся специальный металлический сильфон диаметром 30 мм и длиной 60 мм.

На рисунке 5.18 приведены осциллограммы давления  $P_1$  в напорном трубопроводе и давления в выходном трубопроводе  $P_0$  при работе нового клапанного устройства без упругой емкости. Участок 1-2 на осциллограмме  $P_1$  соответствует давлению в системе установки, когда перепускной и предохранительный клапаны 6-1 и 6-2 закрыты, а рабочая среда проходит через клапан 7-1 (рисунок 5.17).



Рисунок 5.18 – Осциллограммы давления в напорном ( $P_1$ ) и выходном ( $P_0$ ) трубопроводах гидравлической системы при срабатывании предохранительного и перепускного клапанов нового клапанного устройства

После закрытия клапана 7-1 давление в системе лабораторной установки поднимается и срабатывают перепускной и предохранительный клапаны 6-1 и 6-2. Давление в нагнетательном трубопроводе нарастает по линии 2-3-4 (рисунок 5.18). При открытии клапана 7-1 (рисунок 5.17) перепускной 6-1 и предохранительный 6-2 клапаны закрываются и давление изменяется по линиям 4-7. Давление в выходном трубопроводе в этом случае изменяется по линиям 8-18.

На рисунке 5.19 приведены осциллограммы работы клапанного устройства после 100 тысяч циклов срабатывания. Эти осциллограммы отражают два характерных режима работы клапанного устройства, а именно, когда предохранительный клапан работает в режиме обычного предохранения и в автоколебательном режиме.

Настройка клапанного устройства производилась на 13 МПа. При работе предохранительного клапана в обычном режиме предохранения давление в нагнетательном трубопроводе изменяется по линиям 2-7, а в автоколебательном режиме – по линиям 8-11. Давление в выходной полости  $P_0$  изменяется соответственно по линиям 21-24. Если предохранительный клапан работает в режиме обычного предохранения, то давление в системе равно около 13 МПа и колеблется с амплитудой около 1,8 МПа.



Рисунок 5.19 – Осциллограммы давления в напорном (линии 1 - 11) и выходном (линии 12 - 24) трубопроводах гидравлической системы при срабатывании изношенных предохранительного и перепускного клапанов клапанного устройства

В выходной полости также наблюдается интенсивное колебание давления с амплитудой около 0,4 МПа (участок 15-16 на рисунке 5.19). Если же предохранительный клапан переходит в автоколебательный режим, тогда давление в системе установки снижается до 7,5 МПа. Колебания давления как в нагнетательной, так и в выходной магистралях значительно меньше, чем при работе предохранительного клапана в режиме обычного предохранения.

Из обоих рисунков 5.18 и 5.19 видно, что при срабатывании клапанного устройства в гидросистеме появляются пиковые давления, достигающие 16,8 МПа при настройке клапанного устройства на 13 МПа. Забросы давления в выходном трубопроводе (участок 13-14-15 на рисунке 5.18) достигают 1,0 МПа. В нагнетательном трубопроводе при закрытии клапанов 6-1 и 6-2 (участок 5-6-7 на рисунке 5.18) наблюдаются колебания давления с размахом около 1,9 МПа.

Подключение упругой емкости к камере за перепускным клапаном качественно изменяет работу клапанного устройства. На рисунке 5.20 приведены осциллограммы давления в нагнетательном трубопроводе  $P_1$  (участок 1-7) и в выходном трубопроводе  $P_0$  (участок 8-18).

Как видно из рисунка при срабатывании клапанного устройства давление в нагнетательном трубопроводе медленно поднимается до давления настройки. Причем, перепускной клапан срабатывает самостоятельно и забросов давления выше установленного не наблюдается (участок 2-3-4). Колебательность клапанов существенно ниже, чем при работе клапанного устройства без упругой емкости. Скорость нарастания давления (на участке 2-3) равна 45 МПа/с, что почти в 4 раза ниже, чем нарастание давления при срабатывании клапанного устройства без упругой емкости.



Рисунок 5.20 – Осциллограммы давления в напорном ( $P_1$ ) и выходном ( $P_0$ ) трубопроводах гидравлической системы при срабатывании предохранительного и перепускного клапанов клапанного устройства с упругой емкостью

Как видно из осциллограмм, упругая емкость оказывает влияние также и при закрытии клапанов. Забросы давления в выходном трубопроводе (участок 13-14-15) достигают только 0,7 МПа, а давление в напорном трубопроводе (участок 5-6-7) равно 0,45 МПа, которое значительно меньше давления, возникающего при работе клапанного устройства без упругой емкости (участок 5-6-7 на рисунке 5.18).

Экспериментальные исследования полностью подтверждают теоретические положения о влиянии упругой емкости на работу перепускного и предохранительного клапанов клапанных устройств гидравлических систем испытаний на герметичность изделий и показывают, что данным способом можно существенно снизить забросы давления, колебательность клапанов и градиенты давлений.

Влияние упругой емкости на работу перепускного и предохранительного клапанов клапанного устройства не ограничивается только данной конструктивной формой, а характерно для различных конструктивных форм двухступенчатых клапанов. Эти положения распространяются также и на одноступенчатые клапаны – клапаны прямого действия.

Чтобы улучшить качество работы и увеличить долговечность таких клапанов необходимо подключить на входе пневматическую цепь, состоящую

из сопротивления и упругой емкости. Подключение такой гидравлической цепи уменьшает влияние гидравлических ударов, поступающих из системы, и упругости трубопроводов.

Для выяснения влияния упругой емкости на износ и герметичность клапанов проведены специальные исследования. На рисунке 5.21 приведены зависимости утечек рабочей жидкости от числа циклов срабатывания клапанного устройства.



1 – при работе клапанов без упругой емкости; 2 – при работе клапанов с упругой емкостью

Рисунок 5.21 - Зависимость суммарных утечек рабочей жидкости через перепускной и предохранительный клапаны клапанного устройства в зависимости от числа циклов срабатывания

Кривая 1 показывает изменение утечек рабочей жидкости через все сопряжения перепускного и предохранительного клапанов от числа циклов срабатывания при работе клапанного устройства без упругой емкости, а кривая 2 - с упругой емкостью. Согласно этому рисунку утечки рабочей жидкости при работе клапанного устройства с упругой емкостью почти в 4 раза ниже утечек рабочей жидкости через сопряжения клапанного устройства при работе без упругой емкости.

Износ деталей сопряжений клапан-седло как перепускного, так и предохранительного клапанов, оцениваемый по ширине фасок седел, не превышает 0,17 - 0,20 мм. Настройка клапанного устройства в процессе испытаний не изменялась больше, чем на 0,1- 0,3 МПа. Таким образом, подключение упругой емкости к предохранительным и перепускным клапанам гидравлических систем испытаний на герметичность изделий не только улучшает качество работы клапанов, но и повышает ресурс герметичности.

## 5.7 Экспериментальные исследования работы предохранительных клапанов в автоколебательном режиме

Из условий эксплуатации гидравлических систем испытаний изделий на герметичность, а также согласно работам [61, 65] известно, что предохранительный клапан может работать как в обычном режиме, так и при характерном звуке – треске. На основании этого в работе предохранительного клапана выделены режим обычного предохранения и режим треска клапана, то есть, автоколебательный режим предохранения. Как показали измерения, эти автоколебания происходят со звуковой частотой порядка 400-500 Гц. Измерение частоты ударов клапана о седло проводилось с помощью анализатора спектра шума АШ-2М, к которому подключался пьезоэлектрический датчик через усилитель ПИУ-1.

При значительных гидравлических ударах в гидросистеме предохранительный клапан входит в автоколебательный режим. Этим опровергается мнение эксплуатационников гидросистем о том, что появление треска клапана указывает на его разрегулировку. Переход предохранительного клапана из обычного режима предохранения в автоколебательный режим всегда сопровождается резким понижением давления до 4,5-11,0 МПа при настройке клапанного устройства на 13 МПа.

Давление, которое устанавливается в гидросистеме установки при работе предохранительного клапана в автоколебательном режиме (режиме треска), зависит от расхода рабочей жидкости, подаваемой гидронасосом (прямая 1 на рисунке 5.22).

Кривая 2 (рисунок 5.22) отражает изменение давления в гидросистеме установки при плавном увеличении расхода жидкости через клапанное устройство, которое настроено на давление 13 МПа. На этом же рисунке ограничена область  $cba^{l}add^{l}$ , в которой возможен переход и работа предохранительного клапана в автоколебательном режиме.

При возмущении в гидросистеме давление, поддерживаемое клапанным устройством, с линий  $da (d^{l}a^{l})$  снижается до линии cb и определяется расходом жидкости, подаваемой гидронасосом. При расходе рабочей жидкости меньшем  $120 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с происходит срыв колебаний (прекращение треска) предохранительного клапана.

Настройка клапанного устройства на давление срабатывания, равное, например, 11 МПа (кривая 3 на рисунке 5.22), не изменяет значений давлений в гидросистеме при переходе предохранительного клапана в автоколебательный режим, а соответствует одной и той же линии *cb*.



1- в автоколебательном режиме; 2, 3 – в режиме обычного предохранения и настройке клапана на 13 МПа (кривая 2) и на 11 МПа (кривая 3)

Рисунок 5.22 - Изменение давления в гидросистеме установки в зависимости от расхода рабочей жидкости через клапанное устройство при работе предохранительного клапана

При усилиях пружины меньших, ограниченных прямой 1, происходит срыв колебаний клапана, то есть колебания клапана прекращаются. Основную роль в автоколебательном режиме предохранения оказывает, вероятно, не жесткость механической пружины, а суммарная жесткость механической пружины и гидродинамической жесткости рабочей жидкости, которая создает гидродинамическую силу, приложенную к клапану.

Гидродинамическая жесткость во многих случаях при работе предохранительного клапана превышает в два и более раза жесткость механической пружины и является причиной вхождения клапана в резонансные колебания. При работе предохранительного клапана в автоколебательном режиме предохранения изменение силы пружины почти до полного соприкосновения ее витков не изменяет давления в гидросистеме.

Высокочастотные колебания рабочей жидкости являются не желательными в трубопроводах и гидроагрегатах потому, что могут быстро их вывести из рабочего состояния.

#### 5.8 Экспериментальные исследования герметичности предохранительных и перепускных клапанов гидравлических систем

#### 5.8.1 Исследование герметичности сопряжения перепускной клапанседло в переходном режиме

В работе перепускных клапанов (рисунок 5.13) выделены два режима: переходный режим, при котором перепускной клапан при срабатывании поднимается на относительно большую величину, равную 1,5 – 2,0 мм, после не-

скольких колебаний и переходит в неподвижном состоянии, а потом садится на седло, когда необходимо установить в гидросистеме рабочее давление жид-кости, и режим перегрузки, при котором клапан поднимается на величину 0,15 – 0,20 мм и совершает периодические возвратно-поступательные перемещения (колебания), а потом садится на седло, когда давление в гидросистеме становится ниже заданного значения.



Рисунок 5.23 – Изменение утечек рабочей жидкости (кривая 1) и относительного зазора (кривая 2) сопряжения перепускной клапан– седло в зависимости от числа циклов срабатывания клапана в переходном режиме

В процессе экспериментальных исследований перепускного клапана в переходном режиме после определенного числа циклов его работы измерялись утечки жидкости через сопряжение клапан- седло (кривая 1 на рисунке 5.23). Проведенные исследования деталей сопряжения перепускной клапан-седло до 500-600 тысяч срабатываний в переходном режиме показали, что значительного увеличения фаски седла и износной канавки на конусе не наблюдается. Ширина фаски седла перепускного клапана за 100 тысяч срабатываний не превышает 0,13 – 0,14 мм.

Из проофилограмм, которые снимались с деталей сопряжения клапанседло, видно что материал находится в пластическом состоянии, несмотря на то, что и клапан и седло изготовлены из легированной стали ШХ-15 с последующей термообработкой до твердости HRC 58-63. Таким образом, материал седла и перепускного клапана при работе в переходном режиме вполне удовлетворяет в отношении стойкости против выкрашивания. По утечкам рабочей жидкости (кривая 1 на рисунке 5.23) вычислены значения относительного зазора (кривая 2 на рисунке 5.23) сопряжения перепускной клапан–седло в зависимости от числа циклов срабатывания клапана в переходном режиме. На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что переходный режим оказывает несущественное влияние как на увеличение зазора в сопряжении клапан-седло, так и утечек рабочей жидкости.

#### 5.8.2 Исследование герметичности сопряжения перепускной клапанседло в режиме перегрузки

В режиме перегрузки детали сопряжения перепускной клапан-седло работают в условиях воздействия нестационарного течения рабочей жидкости под большим перепадом давлений, возвратно-поступательных движений клапана вокруг средней высоты подъема и ударных нагрузок, возникающих при посадке клапана на седло. На рисунке 5.24 отражено изменение утечек рабочей жидкости (кривые 1, 2) через сопряжение клапан–седло и относительного зазора в этом сопряжении (кривые 3, 4) в зависимости от числа циклов срабатывания перепускного клапана в режиме перегрузки.

Измерение утечек проводилось при давлениях 10 МПа (кривая 1) и 8 МПа (кривая 2). Кривые 1 и 2 после 70 тысяч срабатываний перепускного клапана имеют перегиб, после которого утечки нарастают значительно интенсивнее. Кривая 3 построена по утечкам, которые измерялись при давлении 10 МПа, а кривая 4 построена по утечкам, измеряемым при давлении 8 МПа. Кривые относительного износа, вычисленные по утечкам, измеряемым как при давлении 10 МПа, так и при давлении 8 МПа, почти полностью совпадают (кривые 3 и 4 на рисунке 5.24).



Рисунок 5.24 - Изменение утечек рабочей жидкости (кривые 1,2) через сопряжение клапан-седло и относительного зазора в этом сопряжении (кри-

вые 3, 4) в зависимости от числа циклов срабатывания перепускного клапана в режиме перегрузки

Значительное увеличение утечек рабочей жидкости через перепускной клапан после 70 тысяч срабатываний, о чем свидетельствует подъем кривых 1 и 2 на рисунке 5.24, определяется износом деталей сопряжения клапан-седло. Износ деталей сопряжения является локальным (дискретным), а не простым увеличением ширины уплотнительной поверхности.

## 5.8.3 Исследование герметичности перепускных клапанов в переходном режиме и режиме перегрузки

Исследования перепускных клапанов, работающих одновременно в переходном режиме и режиме перегрузки, позволяют выявить влияние ударных воздействий на уплотнительные поверхности клапана совместно с воздействиями рабочей жидкости.

Утечки рабочей жидкости, представленные кривой 1 (рисунок 5.25), измерялись при подключении эталонного предохранительного клапана к перепускному клапану при давлении в гидросистеме установки, равном 10 МПа. Значение утечек жидкости достигает  $8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с после 100 тысяч срабатываний клапана и почти в два раза меньше, нежели в режиме перегрузки (кривая 1 на рисунке 5.24).

Снижение утечек жидкости через сопряжение перепускной клапан-седло испытываемого в переходном режиме и режиме перегрузки (кривая 1 на рисунке 5.25) по сравнению с утечками жидкости в режиме перегрузки (кривая 1 на рисунке 5.24) можно объяснить тем, что в первом случае дополнительные удары (от переходного режима) восстанавливают сопряжение в отношении гидравлической плотности.

Следует отметить, что при исследовании перепускных клапанов при совмещении переходного режима и режима перегрузки в некоторых случаях (до 15%) наблюдается существенный рост эксцентриситета уплотнительных поверхностей и утечек через клапан (кривая 2 на рисунке 5.25). Причиной такого интенсивного нарастания эксцентриситета уплотнительных поверхностей перепускных клапанов, повидимому, является их двойная работа на двух режимах: переходном и перегрузки.



1 – при отсутствии эксцентриситета в сопряжении клапан-седло; 2444 при появлении эксцентриситета в сопряжении клапан-седло в процессе исследований

Рисунок 5.25 - Изменение утечек рабочей жидкости через сопряжение перепускной клапан–седло в зависимости от числа циклов срабатывания клапана в переходном режиме и режиме перегрузки

При работе клапана одновременно в переходном режиме и режиме перегрузки происходит как бы двойное его центрирование относительно седла: центрирование рабочей жидкостью при дросселировании ее в переходном режиме, когда клапан находится на малом расстоянии от седла, и центрирование геометрическими размерами всего перепускного клапана, когда он находится на значительном удалении от седла в режиме перегрузки.

## 5.8.4 Исследование герметичности предохранительных клапанов в автоколебательном режиме предохранения

Проведенными исследованиями предохранительных клапанов в автоколебательном режиме (режиме треска) (рисунок 5.26) установлено, что износ деталей сопряжений клапан-седло существенно меньше по сравнению с износом этих деталей, поступающих в ремонт и достигающих значения 0,4 – 0,5 мм, а иногда и 1,5 мм.



Рисунок 5.26 – Изменение утечек рабочей жидкости через сопряжение предохранительный клапан – седло (кривая 1) и относительного зазора того же сопряжения (кривая 2) в зависимости от времени работы клапана в автоколебательном режиме предохранения

### 5.8.5 Исследование герметичности предохранительных клапанов в режиме обычного предохранения

Режим обычного предохранения является основным видом работы предохранительных клапанов гидравлических систем (рисунок 5.27). Кривая 1 (рисунок 5.27) показывает изменение утечек рабочей жидкости через новый предохранительный клапан, а кривые 2-6 - после 20, 40, 60, 80 и 100 тысяч циклов его срабатывания. Из рисунка 5.27 можно установить, что в процессе работы предохранительного клапана происходит сдвиг кривых утечек рабочей жидкости влево, то есть, в сторону более низких давлений, и уменьшение наклона кривых утечек жидкости.

Сдвиг кривых утечек жидкости в сторону более низких давлений можно объяснить разрегулировкой клапана в результате износа деталей сопряжения клапан-седло. Уменьшение наклона кривых утечек жидкости не совсем ясно. Поэтому рассмотрим процессы, происходящие при работе предохранительного клапана более подробно теоретически и при экспериментальных исследованиях.



кривые 1 – 6 соответствуют 0, 20, 40, 60, 80 и 100 тысячам циклов срабатывания клапана

Рисунок 5.27 – Изменение утечек рабочей жидкости через предохранительный клапан клапанного устройства в зависимости от давления в гидравлической системе и числа циклов срабатывания

Вначале установим влияние настройки всего клапанного устройства на утечки рабочей жидкости через предохранительный клапан. Высота подъема предохранительного клапана  $h_{cp.uu}$ , м, над седлом, с учетом расхода жидкости через клапан [61]

$$h_{cp.uu} = \frac{Q_{uu}}{\mu_k \pi d_c \sin \alpha} \sqrt{\frac{\rho}{2(P_1 - P_{uu} - P_0)}},$$
 (5.61)

где  $Q_{\mu}$  - расход жидкости через предохранительный клапан, м<sup>3</sup>/с;

 $\rho$ ,  $\mu_{\kappa}$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>, и коэффициент расхода жидкости через сопряжение предохранительный клапан - седло;

α - половина угла между касательными к шаровому клапану в точках его контакта с седлом, градусов;

*P*<sub>1</sub>, *P*<sub>0</sub>, *P*<sub>*u*</sub> – давление жидкости до и после предохранительного клапана и потери давления жидкости на общем гидравлическом сопротивлении клапанного устройства, МПа.

Исследование предохранительных клапанов в режиме обычного предохранения проводилось на клапанных устройствах, в которые входят перепускной и предохранительный клапаны (рисунок 5.13). Поэтому потери давления жидкости  $P_{u}$  на общем гидравлическом сопротивлении клапанного устройства

$$P_{\iota\iota} = Q^2_{\iota\iota} R_{\iota\iota\iota} , \qquad (5.62)$$

где  $R_{zu}$  - общее гидравлическое сопротивление, включающее сопротивление дроссельного отверстия в поршне перепускного клапана и сопротивление предохранительного клапана: входа в канал клапана и отверстия в седле и сопряжения клапан-седло, МПа·  $c^2/m^6$ .

С другой стороны, так как высота подъема предохранительного клапана над седлом не превышает 0,2 мм [61], а диаметр седла, равный 4 мм, значительно больше высоты подъема клапана, тогда можно принять, что сила от механической пружины, действующая на клапан, уравновешивается силой от давления рабочей жидкости. Высота подъема предохранительного клапана с учетом жесткости его пружины

$$h_{cp.ul} = \pi d_c^2 \left[ P_1 - (P_{ul} + P_0) - P_{Hul} \right] / 4C_{np.ul}, \qquad (5.63)$$

где *С*<sub>*пр.ш*</sub> - жесткость пружины предохранительного клапана, H;

*P<sub>нш</sub>*- перепад давления, при котором предохранительный клапан открывается, МПа.

Приравнивая выражения (5.61) и (5.63) с учетом (5.62), получим

$$Q_{u} = A_{u} \sqrt{P_1 - Q_{u}^2 R_{zu} - P_0} \left( P_1 - Q_{u}^2 R_{zu} - P_0 - P_{Hu} \right),$$
(5.64)

где

$$A_{uu} = \left(\pi^2 d_c^2 \mu_k \sin \alpha / 4 C_{np.uu}\right) \sqrt{2/\rho}.$$

Если ввести обозначение  $x = \sqrt{P_1 - Q_m^2 R_{zu} - P_0}$ , тогда уравнение (5.64) принимает вид  $A_m x^3 - A_m P_{Hm} x - Q_m = 0$ . Решая это уравнение по методу Кардано [76], получим

$$P_{1} = \left[ \sqrt[3]{\frac{Q_{uu}}{2A_{uu}} + \sqrt{\frac{Q_{uu}^{2}}{4A_{uu}^{2}} - \frac{P_{\mu uu}^{3}}{27}} + \sqrt[3]{\frac{Q_{uu}}{2A_{uu}} - \sqrt{\frac{Q_{uu}^{2}}{4A_{uu}^{2}} - \frac{P_{\mu uu}^{3}}{27}}} \right]^{2} + Q_{uu}^{2}R_{zuu} + P_{0.(5.65)}$$

По выражению (5.65) построены на рисунке 5.28 теоретические кривые изменения расхода рабочей жидкости через предохранительный клапан в зависимости от давления в системе и его настройки. Из рисунка 5.28 можно установить, что снижение давления настройки предохранительного клапана приводит к параллельному смещению кривых  $Q_{uu} = f(P_1)$  влево. Это означает, что в процессе разрегулировки предохранительного клапана от износа его деталей также должно происходить смещение кривых утечек жидкости влево по сравнению с новыми клапанами. Для проверки этих положений были проведены экспериментальные исследования.



кривые 1- 9 соответствуют настройке предохранительного клапана на давление, равное 8,0; 8,5; 9,0; 9,5; 10,0; 10,5; 11,0; 11,5; 12,0 МПа

Рисунок 5.28 – Теоретические кривые изменения расхода рабочей жидкости через предохранительный клапан в зависимости от давления в системе и настройки клапана

На рисунке 5.29 приведены графики изменения утечек жидкости через предохранительный клапан в зависимости от давления в гидравлической системе при настройке его на давление начала открытия, равное 10,5 МПа (кривая 3) и 9,5 МПа (кривая 4).



кривые 1, 3 – 13,5 МПа, кривые 2, 4 – 12,5 МПа

Рисунок 5.29 – Теоретические (1, 2) и экспериментальные (3, 4) кривые утечек жидкости через предохранительный клапан в зависимости от давления в системе и его настройки

Из рисунка 5.29 видно, что как теоретические (кривые 1 и 2 на рисунке 5.29), так и экспериментальные кривые 3 и 4 (рисунок 5.29) сдвигаются параллельно влево при разрегулировке клапана.

Поэтому, чтобы исключить влияние разрегулировки клапана на утечки жидкости (кривые 2-6 из рисунка 5.27), эти кривые сдвинуты вправо до соприкосновения с кривой 1 (рисунок 5.30).

По кривым 1 - 6 (рисунок 5.30) определены утечки жидкости для давления, равного 10 МПа, по которым вычислены значения относительного зазора. На рисунке 5.31 приведены значения относительного зазора в сопряжении предохранительный клапан – седло в зависимости от числа циклов срабатывания предохранительного клапана в режиме предохранения.



Рисунок 5.30 – Изменение утечек жидкости через предохранительный клапан



Рисунок 5.31 – Изменение относительного зазора сопряжения предохранительный клапан–седло в зависимости от числа циклов срабатывания в режиме обычного предохранения

### 6 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕ-ЛИЙ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

6.1 Емкостные измерительные преобразователи систем испытаний изделий на герметичность

## 6.1.1 Расположение емкостных измерительных преобразователей в устройствах испытаний изделий на герметичность

В устройствах испытаний изделий на герметичность с использованием пузырькового, манометрического или гидростатического метода основной измеряемой величиной является расход контрольного газа, который проходит через пузырьковую камеру или горизонтальную трубку при испытаниях изделий на герметичность. В системах автоматизированного контроля герметичности этот расход суммируется за время испытаний изделия. В системах автоматического управления этого расхода газа, например, в системах автоматического управления амплитудой возмущений давления в изделии или эталонной емкости.

На рисунке 3.15 приведена схема устройства испытаний на герметичность изделий газом с использованием пузырьковой камеры. Пузырьки контрольного газа, выходящие из барботажной трубки 3 в жидкость пузырьковой камеры 2, воспринимаются измерительным преобразователем 9 и суммируется счетчиком 10. В качестве измерительного преобразователя пузырьков газа на нижнем срезе барботажной трубки используются емкостный измерительный преобразователь или контактный преобразователь.

Суть процесса при формировании и отрыве пузырьков газа от нижнего среза барботажной трубки состоит в том, что мениск жидкости изменяет свое положение в широком диапазоне (0 - 3 мм) и вызывает изменение емкости емкостного преобразователя.

Емкостный измерительный преобразователь, используемый в пузырьковой камере, например, в системе автоматического управления амплитудой возмущения давления пробной среды размещают также на барботажной трубке 3 на верхнем уровне жидкости пузырьковой камеры 2 (рисунок 3.15).

На рисунке 3.22 приведена схема устройства испытаний на герметичность изделий с использованием горизонтальной трубки с жидкостным поршнем. Перемещение жидкостного поршня 9 в горизонтальной трубке 8 измеряется емкостным преобразователем 11 с вторичным показывающим прибором 12.

# 6.1.2 Вывод исходных уравнений емкостного измерительного преобразователя систем испытаний изделий

На рисунке 6.1 приведена схема емкостного измерительного преобразователя, например, системы автоматического управления амплитудой возмущений давления в устройстве испытаний изделий на герметичность с использованием пузырьковой камеры 1 по уровню жидкости в барботажной трубке 3. Барботажная трубка 3 выполнена из стекла и имеет в сечении А-А форму прямоугольника для того, чтобы увеличить площадь пластин конденсатора и уменьшить расстояние между этими пластинами. В нижней части 5 барботажная трубка 3 выполнена цилиндрической для формирования сферических пузырьков газа, проходящих через жидкость пузырьковой камеры 1.



Рисунок 6.1 - Схема емкостного измерительного преобразователя устройств испытаний изделий на герметичность с использованием пузырьковой камеры

Емкость плоского конденсатора  $C_E$ ,  $\Phi$ , определяется по формуле [62, 63]  $C_E = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{\delta},$  (6.2)

где  $\varepsilon_0$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, равная 8,86  $\cdot 10^{-12} \, \Phi/M$  [70];

 $\varepsilon_r$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды между пластинами (для воздуха  $\varepsilon_r = 1$ , стекла  $\varepsilon_r = 7$  и для жидкости (воды)  $\varepsilon_r = 81$  [70];

S - площадь пластин конденсатора, м<sup>2</sup>, равная  $L \cdot b$ , где

*b*, *L* - ширина и длина пластин конденсатора, м;

 $\delta\,$  - расстояние между пластинами конденсатора, м.

Емкость  $C_{\mathcal{H}}$ ,  $\Phi$ , части конденсатора с жидкостной средой между пластинами (водой) (рисунок 6.1) определяется по формуле

$$C_{\mathcal{H}} = \frac{\varepsilon_0 \cdot h_1 \cdot b}{\frac{2\delta_1}{\varepsilon_{ru3}} + \frac{\delta_2}{\varepsilon_{r\mathcal{H}}}},$$
(6.3)

где  $\varepsilon_{rus}$ ,  $\varepsilon_{rж}$  - диэлектрическая проницаемость материала барботажной трубки (стекла) и жидкости;

 $\delta_1, \delta_2$  - толщина стеклянной стенки барботажной трубки и жидкостного слоя (воды) в этой трубке, м;

 $h_1$  – длина частей пластин конденсатора, между которыми находится жидкость, м.

Для воздушной части измерительного преобразователя емкость

$$C_{\theta} = \frac{\varepsilon_0 \cdot (L - h_1) \cdot b}{\frac{2\delta_1}{\varepsilon_{ru3}} + \frac{\delta_2}{\varepsilon_{r_{\theta}}}}.$$
(6.4)

Полная емкость измерительного преобразователя С, Ф,

$$C_E = C_{\mathcal{H}C} + C_{\theta} = \frac{\varepsilon_0 \cdot h_1 \cdot b}{A_{1C}} + \frac{\varepsilon_0 \cdot (L - h_1) \cdot b}{A_{2C}}, \qquad (6.5)$$

где

$$A_{1C} = \left(\frac{2\delta_1}{\varepsilon_{rus}} + \frac{\delta_2}{\varepsilon_{rsc}}\right); \qquad A_{2C} = \left(\frac{2\delta_1}{\varepsilon_{rus}} + \frac{\delta_2}{\varepsilon_{rs}}\right).$$

Если уровень в барботажной трубке пузырьковой камеры увеличивается на  $\Delta h_1$ , тогда  $h_1 = h_1 + \Delta h_1$  и емкость измерительного преобразователя составит

$$C_E + \Delta C_E = \frac{\varepsilon_0 \cdot (h_1 + \Delta h) \cdot b}{A_{1C}} + \frac{\varepsilon_0 \cdot [L - (h_1 + \Delta h_1)] \cdot b}{A_{2C}},$$

где  $\Delta C_E$  - изменение емкости преобразователя уровня жидкости в барботажной трубке,  $\Phi$ .

Изменение емкости измерительного преобразователя  $\Delta C_E = (C_E + \Delta C_E) - C_E$  или

$$\Delta C_E = \frac{\Delta h_1 \cdot \varepsilon_0 \cdot b}{A_{1C}} - \frac{\Delta h_1 \cdot \varepsilon_0 \cdot b}{A_{2C}}.$$
(6.6)

Относительное приращение емкости измерительного преобразователя  $\Delta C_E/C_E$  с учетом выражений (6.5) и (6.6)

$$\frac{\Delta C_E}{C_E} = \frac{\Delta h_1}{h_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L}{h_1} \cdot \frac{\varepsilon_{r_{\theta}} (2\delta_1 \cdot \varepsilon_{r_{\mathcal{H}}} + \delta_2 \cdot \varepsilon_{r_{u_3}})}{\delta_2 \cdot \varepsilon_{r_{u_3}} (\varepsilon_{r_{\mathcal{H}}} - \varepsilon_{r_{\theta}})}.$$
(6.7)

Если принять [70], что  $\varepsilon_{r,\omega} = 81$  (для воды);  $\varepsilon_{r_{\theta}} = 1$  (для воздуха);  $\varepsilon_{r_{u_3}} = 7$  (для стекла), тогда получим

$$\frac{\Delta C_E}{C_E} = \frac{\Delta h_1}{h_1} \cdot \frac{1}{\left[1 + \frac{L}{h_1} \cdot \left(0, 29\frac{\delta_1}{\delta_2} + 0, 01\right)\right]}.$$
(6.8)

Если  $\delta_1 = 1 \cdot 10^{-3}$  м,  $\delta_2 = 4 \cdot 10^{-3}$  м,  $L = 20 \cdot 10^{-3}$  м,  $h_1 = 10 \cdot 10^{-3}$  м, тогда

$$\frac{\Delta C_E}{C_E} = \frac{\Delta h_1}{h_1} \cdot \frac{1}{1+0.165} = 0.86 \frac{\Delta h_1}{h_1}.$$
 (6.9)

Если  $\Delta h_I = 1 \cdot 10^{-3}$  м при  $h_1 = 10 \cdot 10^{-3}$  м, тогда  $\Delta C_E/C_E = 0,086$ . Принимая, например, что  $C_E = 100$  %, получим  $\Delta C_E = 8,6$  %. То есть, при изменении уровня жидкости на 1 мм в барботажной трубке емкость измерительного преобразователя уровня жидкости изменяется на 8,6 %. Это вполне приемлемое значение для нормальной работы измерительного преобразователя как в системе автоматизированного контроля герметичности, так и в системе автоматического управления.

По формуле (6.5) можно определить исходное значение емкости измерительного преобразователя (когда уровень жидкости находится на заданном значении) (при  $\delta_1 = 1 \cdot 10^{-3}$  м;  $\delta_2 = 3 \cdot 10^{-3}$  м;  $L = 20 \cdot 10^{-3}$  м;  $h_1 = 10 \cdot 10^{-3}$  м;  $b = 3 \cdot 10^{-3}$  м;  $\varepsilon_{r,w} = 81$  (для воды);  $\varepsilon_{rs} = 1$  (для воздуха);  $\varepsilon_{rus} = 7$  (для стекла);  $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  [70])  $C_E = 0,904 \text{ пФ}$ .

#### 6.1.3 Чувствительность емкостного измерительного преобразователя

Чувствительность емкостного измерительного преобразователя  $S_{un}$ ,  $\Phi/M$ , представляет отношение изменения емкости  $dC_E$ ,  $\Phi$ , к изменению уровня жидкости  $dh_1$ , м, то есть,  $S_{un} = dC_E/dh_1$ .

Дифференцируя выражение (6.5) по  $dh_1$ , получим

$$S_{un} = \frac{dC_E}{dh_1} = \frac{\varepsilon_0 \cdot b}{A_{1C}} - \frac{\varepsilon_0 \cdot b}{A_{2C}}.$$
(6.10)

Для рассматриваемого измерительного преобразователя  $\delta_1 = 1$  мм,  $\delta_2 = 3$  мм, b = 3 мм,  $\varepsilon_{r_6} = 1$ ,  $\varepsilon_{r_{3c}} = 81$ ,  $\varepsilon_{r_{u_3}} = 7$ . Тогда  $S_{un} = 8,29 \cdot \varepsilon_0$ , Ф/м. Если  $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$  Ф/м, тогда  $S_{un} = 8,29 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12}$  Ф/м = 0,0734 пФ/мм.

### 6.1.4 Коэффициент чувствительности емкостного измерительного преобразователя и влияние на него различных жидкостей

В формуле (6.7) введем обозначение

$$\beta_c = \beta_{h_1} \cdot K_c, \tag{6.11}$$

где  $\beta_c$  и  $\beta_{h_1}$  - относительные изменения емкости и уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры  $h_1$ :

$$\beta_c = \frac{\Delta C_E}{C_E}; \qquad \beta_{h_1} = \frac{\Delta h_1}{h_1}; \qquad (6.12)$$

 $K_{\rm c}$  – коэффициент чувствительности (и нелинейности) емкостного измерительного преобразователя

$$K_{c} = \frac{1}{1 + \frac{L}{h_{1}} \cdot \frac{\left[\left(2\delta_{1} \cdot \varepsilon_{r \varkappa c} / \delta_{2} \cdot \varepsilon_{r \imath \imath \imath}\right) + 1\right]}{\left[\left(\varepsilon_{r \varkappa c} / \varepsilon_{r \imath \imath}\right) - 1\right]}.$$
(6.13)

Если  $\delta_1 = 1$  мм; L = 20 мм;  $\varepsilon_{rsc} = 81$  (для воды);  $\varepsilon_{rs} = 1$  (для воздуха);  $\varepsilon_{rus} = 7$  (для стекла), тогда (при  $h_1$  в мм)

$$K_{c} = \frac{1}{1 + \frac{\left[\left(5,80 \cdot \varepsilon_{r \to c}/\delta_{2}\right) + 1\right]}{h_{1}\left(\varepsilon_{r \to c} - 1\right)}}.$$
(6.14)

На рисунке 6.2 приведены графики, построенные по выражению (6.14), зависимости  $K_c = f(\delta_2)$  при использовании в пузырьковой камере воды  $\varepsilon_{r,mc} =$ 81; этилового спирта  $\varepsilon_{r,mc} = 26,8$ ; керосина  $\varepsilon_{r,mc} = 4,4$  или трансформаторного масла  $\varepsilon_{r,mc} = 2,24$  [70] при  $h_1 = 10$  мм, а на рисунке 6.3 - зависимости  $K_c = f(h_1)$ при использовании в пузырьковой камере этилового спирта  $\varepsilon_{r,mc} = 26,8$ ; керосина  $\varepsilon_{r,mc} = 4,4$  или трансформаторного масла  $\varepsilon_{r,mc} = 2,24$  [70] и при  $\delta_2 = 3$  мм.



1-воды; 2-этилового спирта; 3-керосина; 4-трансформаторного масла Рисунок 6.2 - Зависимости  $K_c = f(\delta_2)$  при использовании в пузырьковой камере различных жидкостей

Из выражения (6.5) можно записать чему равен уровень  $h_1$  от измеренной измерительным преобразователем емкости

$$h_{1} = \frac{\left[\frac{C_{E}}{\varepsilon_{0} \cdot b} \cdot \left(\frac{2\delta_{1}}{\varepsilon_{ru3}} + \frac{\delta_{2}}{\varepsilon_{rg}}\right) - L\right] \cdot \left(\frac{2\delta_{1}}{\delta_{2}} \cdot \frac{\varepsilon_{rxc}}{\varepsilon_{ru3}} + 1\right)}{\left(\frac{\varepsilon_{rxc}}{\varepsilon_{rg}} - 1\right)}.$$
(6.15)

Если  $\delta_1 = 1 \cdot 10^{-3}$  м;  $\delta_2 = 3 \cdot 10^{-3}$  м;  $\varepsilon_{re} = 1$ ;  $\varepsilon_{r:m} = 81$ ;  $L = 20 \cdot 10^{-3}$  м;  $b = 3 \cdot 10^{-3}$  м;  $\varepsilon_{ru3} = 7$ , тогда  $h_1 = 1,20C_E/\varepsilon_0 - 0,022$  м.



1 - воды; 2 - этилового спирта; 3 - керосина; 4 - трансформаторного масла

Рисунок 6.3 - Зависимости  $K_c = f(h_1)$  при использовании в пузырьковой камере различных жидкостей

Таким образом, для рассматриваемого емкостного измерительного преобразователя уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры справедливо эмпирическое соотношение вида

$$h_1 = 1,20C_E / \varepsilon_0 - 0,022.$$
 (6.16)

Если  $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \Phi/M$  и  $C_E = 1 \cdot 10^{-12} \Phi = 1 \pi \Phi$ , тогда  $h_1 = 0,161 M$  на 1 п $\Phi$ .

#### 6.1.5 Суммарная погрешность емкостного измерительного преобразователя

Общая погрешность звена или прибора *Δα* (функциональная погрешность) определяется в виде суммы погрешностей [62]

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_{l1} + \Delta \alpha_{l2} + \ldots + \Delta \alpha_{q_1} + \Delta \alpha_{q_2} + \Delta \alpha_v + \Delta \alpha_j, \quad (6.17)$$

где  $\Delta \alpha_{li} = (\partial \alpha / \partial l_i) \Delta l_i$  - частная производная от каждой первичной погрешности;

 $\Delta l_i$  – первичная погрешность, представляющая собой отклонение параметра  $l_i$  от нормального значения.

Рассмотрим погрешность емкостного измерительного преобразователя уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры, емкость которого определяется формулой (6.5). Считаем, что погрешность имеют величины  $h_1$ , b, L,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ , которые определяются следующими выражениями:

$$\begin{split} \Delta C_{h_1} &= \frac{\partial C_E}{\partial h_1} \Delta h_1 = \left[ \frac{\varepsilon_0 \cdot b}{A_{1C}} - \frac{\varepsilon_0 \cdot b}{A_{2C}} \right] \cdot \Delta h_1; \\ \Delta C_b &= \frac{\partial C_E}{\partial b} \Delta b = \left[ \frac{\varepsilon_0 \cdot h_1}{A_{1C}} + \frac{\varepsilon_0 \cdot (L - h_1)}{A_{2C}} \right] \cdot \Delta b; \\ \Delta C_{\delta_1} &= \frac{\partial C_E}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 = \left[ -\frac{2\varepsilon_0 \cdot h_1 \cdot b}{\varepsilon_{rus} A_{1C}^2} - \frac{2\varepsilon_0 \cdot b \cdot (L - h_1)}{\varepsilon_{rus} A_{2C}^2} \right] \cdot \Delta \delta_1; \\ \Delta C_L &= \frac{\partial C_E}{\partial L} \Delta L = \frac{\varepsilon_0 \cdot b}{A_{2C}} \cdot \Delta L; \end{split}$$

$$\Delta C_{\delta_2} = \frac{\partial C_E}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 = \left[ -\frac{\varepsilon_0 \cdot h_1 \cdot b}{\varepsilon_{\mathcal{H}} \cdot A_{1C}^2} - \frac{\varepsilon_0 \cdot b \cdot (L - h_1)}{\varepsilon_{\mathcal{G}} \cdot A_{2C}^2} \right] \cdot \Delta \delta_2.$$

Принимаем, что b = 3 мм;  $\delta_2 = 3$  мм;  $\delta_1 = 1$  мм; L = 20 мм;  $\Delta b = 0,1$  мм;  $\Delta \delta_2 = 0,5$  мм;  $\Delta \delta_1 = 0,05$  мм;  $\Delta L = 0,2$  мм;  $\varepsilon_{rs} = 1,0$ ;  $\varepsilon_{rsc} = 81,0$ ;  $h_1 = 10$  мм;  $\varepsilon_{rus} = 7$ ;  $\Delta h_1 = 0,5$  мм, тогда:  $\Delta C_{h_1} = +4,13 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon_0$ ;  $\Delta C_b = +2,76 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon_0$ ;  $\Delta C_{\delta_1} = -4,00 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon_0$ ;  $\Delta C_{\delta_2} = -3,03 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon_0$ ;  $\Delta C_L = +0,18 \cdot 10^{-3} \varepsilon_0$ .

Суммарная погрешность емкостного измерительного преобразователя  $\sum \Delta C_E = \varepsilon_0(+4,13+2,76-4,00-3,03+0,18) \cdot 10^{-3} = 0,04 \cdot 10^{-3} \varepsilon_0 = 0,04 \cdot 10^{-3} \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \Phi = 0,000354 \, \mathrm{n}\Phi.$ 

Рассматривая выше определенную чувствительность емкостного измерительного преобразователя  $S_{un} = 0,0734 \text{ п}\Phi/\text{мм}$  и суммарную погрешность можно составить пропорцию, учитывая перемещение уровня жидкости на 1 мм:

«чувствительность емкостного измерителя соответствует 0,0734 п $\Phi$  и составляет 100 %, а суммарная погрешность, равная 0,000354 п $\Phi$  составляет X %».

Из пропорции определяем, что суммарная погрешность емкостного измерительного преобразователя составляет 0,48 % от чувствительности, другими словами – от изменения емкости преобразователя при изменении уровня жидкости в барботажной трубке на 1 мм.

### 6.1.6 Передаточная функция емкостного измерительного преобразователя

Принципиальная электрическая схема емкостного измерительного преобразователя приведена на рисунке 6.4, а схема подключения его к усилителю У1 – на рисунке 6.5.



Рисунок 6.4 - Принципиальная электрическая схема емкостного измерительного преобразователя

На рисунке 6.4 и 6.5:  $C_E$  – конденсатор емкостного измерительного преобразователя;  $R_E$  – резистор нагрузки;  $U_{ex}$ ,  $U_{eux1}$ ,  $U_{eux2}$  – входное и выходное напряжение емкостного преобразователя и выходное напряжения усилителя, В; ИПС – источник питания стабилизированный для емкостного измерительного преобразователя.



Рисунок 6.5 - Принципиальная электрическая схема подключения емкостного измерительного преобразователя к усилителю

Передаточная функция емкостного измерительного преобразователя представляет реальное дифференцирующее звено и имеет вид

$$W_{un}(s) = \frac{U_{gbux1}(s)}{U_{gx}(s)} = \frac{K_E T_E s}{(T_E s + 1)},$$
(6.18)

где  $T_E$ ,  $K_E$  – постоянная времени, с,  $T_E = C_E \cdot R_E$  и коэффициент усиления емкостного измерительного преобразователя.

## 6.2 Контактные измерительные преобразователи систем испытаний изделий на герметичность

На рисунке 6.6 приведена схема использования контактного измерительного преобразователя в системах автоматизированного контроля герметичности изделий по количеству пузырьков газа, проходящих через барботажную трубку 2 и жидкость пузырьковой камеры 1, при испытаниях пузырьковым или гидростатическим методами.



Рисунок 6.6 - Схема пузырьковой камеры с контактным измерительным преобразователем количества пузырьков газа

Контактный преобразователь представляет собой изолированный по наружной поверхности проводник с не изолированной плоскостью по сечению проводника. Закреплен этот конец проводника не изолированным сечением в нижней части барботажной трубки по центру ее среза.

При отсутствии пузырька газа на нижнем срезе барботажной трубки проходит электрический ток через жидкость пузырьковой камеры и контактный преобразователь. Когда на нижнем срезе сформируется пузырек газа, тогда электрическая цепь разрывается. Количество пузырьков газа подсчитывается счетчиком 4.

### 6.3 Разработка и расчет исполнительного устройства систем автоматического управления (САУ) амплитудой возмущений давления пробной среды

#### 6.3.1 Электрическое моторное исполнительное устройство

Исполнительное устройство с использованием электрических двигателей для создания возмущений по давлению при контроле герметичности изделий имеет принципиальную схему, приведенную на рисунке 6.7. Исполнительное устройство подключается к изделию 1 или к другим элементам системы испытаний и содержит: герконовые выключатели 3 и 10; регулируемый упор 4; толкатель с круглой головкой 5; цилиндрический редуктор 6 и 13; электрический двигатель 7 и 12; диск 8; качающийся рычаг 9; упругую емкость 11; возвратно-поступательный шарнир 14 качающего рычага 9; винтовую пару 15. Через вентиль 2 подводится пробный газ заданного давления в изделие.



Рисунок 6.7 - Исполнительное устройство для создания возмущений по давлению при контроле герметичности изделий

Исполнительное устройство позволяет создавать периодические возмущения давления газа в изделии, а также поддерживать заданное значение амплитуды возмущений давления при работе в системе автоматического управления. Исполнительное устройство содержит две группы элементов: одна груп-

па элементов предназначена для создания периодических возмущений давления газа в изделии, а другая - для регулирования заданного значения амплитуды возмущений давления.

В первую группу элементов входят: электродвигатель 7, редуктор 6, диск 8, на котором закреплен толкатель 5 с круглой головкой, качающийся рычаг 9 и упругая емкость 11. Во вторую группу элементов входят: электродвигатель 12, редуктор цилиндрический 13, винтовая пара 15 с перемещающейся возвратно-поступательный шарнир 14, качающийся рычаг 9, упругая емкость 11, герконовые выключатели 3 и 10 и регулируемый упор 4.

При непрерывном вращении диска 8 от электродвигателя 7 качающийся рычаг 9 некоторую часть от полного оборота диска 8 (около 60 %) совершает угловое движение, а другую часть оборота диска 8 - находится в неподвижном состоянии на регулируемом упоре 4.

Герконовый выключатель 10 подает сигналы на регулирующий блок и не пропускает управляющие сигналы на исполнительный механизм 12, когда толкатель с круглой головкой 5 входит в зацепление с качающимся рычагом 9 и поворачивает его. Герконовый выключатель 3 подает сигналы на регулирующий блок и пропускает управляющие сигналы на исполнительный механизм 12, когда толкатель с круглой головкой 5 выходит из зацепления с качающимся рычагом 9 и не поворачивает его.

Регулирующий блок отрабатывает по заданному закону управляющие сигналы и, при наличии сигнала от герконового выключателя 3, подает на электрический моторный исполнительный механизм 12. Исполнительный механизм через цилиндрический редуктор 13 и винтовую пару 15 перемещает возвратно-поступательный шарнир 14 с качающимся рычагом 9.

При перемещении возвратно-поступательного шарнира 14 с качающимся рычагом 9 влево происходит уменьшение плеча рычага 9, воздействующего на перемещение подвижной части упругой емкости 11, и амплитуда возмущений давления газа в испытательных устройствах уменьшается. При перемещении возвратно-поступательного шарнира 14 с качающимся рычагом 9 вправо происходит увеличение плеча рычага 9, воздействующего на перемещение подвижной части упругой емкости 11, и амплитуда возмущений давления газа в испытательных устройствах уменьшается.

Данное исполнительное устройство применимо как в системах с использованием локальных средств управления, так и при управлении с использованием ЭВМ. Однако, оно содержит два исполнительных механизма и сложные механические передачи с подвижными шарнирами. Учитывая возможности ЭВМ по формированию управляющих сигналов, в работе предложены два вида электромагнитных сильфонных исполнительных устройства.

### 6.3.2 Электромагнитные сильфонные исполнительные устройства

Один из вариантов разработанного исполнительного устройства САУ амплитудой периодических возмущений давления пробной среды в устройстве

контроля герметичности изделий приведен на рисунке 6.8. Определим это исполнительное устройство как электромагнитное сильфонное с пружиной исполнительной устройство.

Обычно исполнительное устройство, согласно стандартам и литературным источникам, например, мембранное исполнительное устройство, состоит из исполнительного механизма и регулирующего органа.

В электромагнитное сильфонное с пружиной исполнительное устройство (рисунок 6.8) входят электромагнитный исполнительный механизм 1 (электромагнит постоянного или переменного тока, тянущий или толкающий с якорем 2) и регулирующий орган, изменяющий подвод среды к объекту управления: сильфон 4, пружина 3, опорная пластина 5, основание 6 и регулировочные винты 7. Внутренняя полость сильфона 4 соединяется с изделием 8 или с другим элементом устройства контроля герметичности изделий.



Рисунок 6.8 - Электромагнитное сильфонное с пружиной исполнительное устройство для создания возмущений по давлению в системах контроля герметичности изделий

Пружина 3 предназначена для компенсации усилия, которое создается испытательным давлением пробного газа внутри сильфона 4 и в изделии 8. Натяжение пружины 3 осуществляется регулировочными микровинтами 7. Однако, изделия испытывают пробным газом или пробной жидкостью давлением, которое изменяется в широком диапазоне, например, от 0,1 до 20,0 МПа.

При таком большом разбросе испытательных давлений для электромагнитного сильфонного с пружиной исполнительного устройства необходим набор пружин, которые должны быть настроены на начальное значение натяжения при испытательном давлении. Кроме этого, необходимо соблюдать при регулировке натяжения пружины горизонтальность опорной пластины 5. Для устранения отмеченных недостатков электромагнитного сильфонного с пружиной исполнительного устройства разработано электромагнитное сильфонное исполнительное устройство для создания возмущений по давлению в устройстве контроля герметичности изделий, схема которого приведена на рисунке 6.9.



Рисунок 6.9 – Электромагнитное сильфонное исполнительное устройство для создания возмущений по давлению в системах контроля герметичности изделий

Электромагнитное сильфонное исполнительное устройство для создания возмущений по давлению в системах контроля герметичности изделий содержит электромагнитный исполнительный механизм 1 (электромагнит постоянного или переменного тока, тянущий или толкающий с якорем 3) и сильфонный регулирующий орган 4, изменяющий подвод среды к объекту управления. Электромагнит 1 и сильфон 4 расположены в камере 2.

Внутренняя полость сильфонного регулирующего органа 4 соединяется с изделием 5 или с другим элементом устройства контроля герметичности изделий. Камера 2 заполняется пробной средой под испытательным давлением из изделия 5 через вентиль 6 перед контролем герметичности изделия. При контроле герметичности изделия 5 вентиль 6 закрыт. При такой схеме электромагнитного сильфонного исполнительного устройства сильфон 4 полностью разгружается от избыточного давления, подведенного внутрь сильфона. С двух сторон сильфона давление пробной среды имеют одно и то же значение в начале контроля герметичности.

При испытаниях негерметичных изделий давление среды в изделии 5 будет немного понижаться по отношению к давлению в камере 2. Давление из камеры 2 будет несколько повышать давление в изделии 5, что является по-

ложительным эффектом потому, что способствует поддержанию постоянным давление в изделии.

Чтобы максимально уменьшить влияние снижения давления в изделии на сильфонный регулирующий орган целесообразно камеру 2, в которой расположено электромагнитное сильфонное исполнительное устройство, подключать не к изделию, а к эталонной емкости устройства испытаний.

# 6.3.3 Дифференциальное уравнение давления в сильфонном регулирующем органе при перемещении его подвижной части

В литературных источниках отсутствуют следующие теоретические положения по электромагнитному сильфонному исполнительному устройству для создания возмущений по давлению при контроле герметичности изделий, которое приведено на рисунке 6.9:

- дифференциальные уравнения, устанавливающие взаимосвязи между перемещением подвижной части сильфона и изменением давлений непосредственно в сильфоне регулирующего органа, в изделии, соединенном с сильфонным регулирующим органом, в изделии и эталонной емкости, соединенных с сильфонным регулирующим органом;

- дифференциальные уравнения, устанавливающие взаимосвязи между перемещением подвижной части сильфона и перемещением жидкостного поршня в горизонтальной трубке, соединенной с изделием и эталонной емкостью;

- методика расчетов по выбору электромагнита и сильфона электромагнитного сильфонного исполнительного устройства.

Рассмотрим эти и другие вопросы, относящиеся к электромагнитному сильфонному исполнительному устройству систем автоматического управления, используемых при контроле герметичности изделий.

На рисунке 6.10 приведена схема сильфонного регулирующего органа, который содержит сильфон 1 и шток 2, перемещающий подвижную часть (торец) сильфона на расстояние  $x_1(t)$ .



Рисунок 6.10 – Схема сильфонного регулирующего органа

Уравнение состояния газа [69] для сильфона 1 (рисунок 6.10)

$$P_{\rm c}V_{\rm c}=m_cRT$$
,

где *P*<sub>c</sub> – давление газа в сильфоне, Па;

 $V_{\rm c}$  – объем сильфона, м<sup>3</sup>;

*m*<sub>c</sub> – масса газа в сильфоне, кг;

*R* - газовая постоянная,  $M^2/(c^2 \cdot K)$ ;

Т - абсолютная температура газа в сильфоне, К.

Когда сильфон 1 сжимается, тогда масса газа в нем остается неизменной, а изменяется объем сильфона  $V_c$  и давление газа  $P_c$ . Поэтому переменными величинами в уравнении состояния газа для сильфона 1 являются объем  $V_c$  и давление  $P_c$ . Если уравнение состояния газа записать как  $P_c = m_c RT/V_c$  и взять производные от принятых переменных величин по времени, тогда получим

$$\frac{1}{m_c RT} \frac{dP_c(t)}{dt} = -\frac{1}{V_c^2} \frac{dV_c(t)}{dt}.$$

Если  $m_c = \rho_c V_c$  и  $dV_c(t) = -F_c dx_1(t)$ , где  $\rho_c$  – плотность газа кг/м<sup>3</sup>;  $F_c$  – эффективная площадь поперечного сечения сильфона, тогда получим дифференциальное уравнение давления в сильфонном регулирующем органе в зависимости от перемещения его подвижной части

$$\frac{dP_c(t)}{dt} = \frac{F_c \rho_c RT}{V_c} \frac{dx_1(t)}{dt}.$$
(6.19)

### 6.3.4 Дифференциальное уравнение давления в сильфонном регулирующем органе, соединенным с изделием

Схема изделия 4, соединенного с сильфонным регулирующим органом 1, приведена на рисунке 6.11. Изделие 4 соединено с сильфоном 1 каналом 3, а не трубопроводом, чтобы не учитывать потери давления газа при движении по трубопроводу. Это условие принимается потому, что потери в трубопроводах при движении среды зависят от скорости ее движения. Сильфон, подключенный к изделию, изменяет расход среды на очень малые значения, а поэтому скорости среды и потери давления также малы. Сильфон 1 имеет объем  $V_c$ ,  $M^3$ , давление газа в нем  $P_c$ , Па, и масса газа  $m_c$ , кг. В изделии объемом  $V_u$ ,  $M^3$ , при давлении газа  $P_u$ , Па, находится масса газа  $m_u$ , кг.



Рисунок 6.11 – Схема сильфонного регулирующего органа, соединенного с изделием Для сильфонного регулирующего органа, соединенного с изделием (рисунок 6.11),  $P_c = P_u = P_{cuc}$  – давления газа в системе, Па;  $m_c + m_u = m_{cuc}$  – масса газа в системе, кг;  $V_c + V_u = V_{cuc}$  – объем устройств системы, м<sup>3</sup>. Уравнение состояния газа для этих устройств:  $P_{cuc} (V_c + V_u) = (m_c + m_u) RT$ .

Когда сильфон 1 сжимается, тогда масса газа в сильфоне 1 и изделии 4 остается неизменной, а изменяется их суммарный объем  $(V_c + V_u)$  и давление газа  $P_{cuc}$ . Поэтому переменными величинами в уравнении состояния газа для сильфона 1 и изделия 4 являются объем  $V_c$  в сумме объемов  $(V_c + V_u)$  и давление  $P_{cuc}$ . Если взять производные от переменных величин по времени в уравнении  $P_{cuc}$  ( $V_c + V_u$ ) =  $(m_c + m_u) RT$ , тогда получим

$$\frac{1}{(m_c + m_u)RT} \frac{dP_{cuc}(t)}{dt} = -\frac{1}{(V_c + V_u)^2} \frac{dV_c(t)}{dt}.$$

Если  $(m_c + m_u) = \rho_c(V_c + V_u)$  и  $dV_c(t) = -F_c dx_1(t)$ , где  $\rho_c$  – плотность газа кг/м<sup>3</sup>,  $F_c$  – эффективная площадь поперечного сечения сильфона и  $dx_1(t)$  – перемещение подвижного торца сильфона, тогда получим дифференциальное уравнение давления в сильфонном регулирующем органе, соединенного с изделием, в зависимости от перемещения подвижного торца сильфона регулирующего органа

$$\frac{dP_{cuc}(t)}{dt} = \frac{F_c \rho_c RT}{\left(V_c + V_u\right)} \frac{dx_1(t)}{dt}.$$
(6.20)

6.3.5 Дифференциальное уравнение давления в сильфонном регулирующем органе, соединенным с изделием, горизонтальной трубкой и эталонной емкостью

Схема сильфонного регулирующего органа 1, соединенного с изделием 3, горизонтальной трубкой 4 и эталонной емкостью 6, приведена на рисунке 6.12.



Рисунок 6.12 – Схема сильфонного регулирующего органа, соединенного с изделием, горизонтальной трубкой и эталонной емкостью

На этой схеме  $V_p$ ,  $V_c$ ,  $V_u$  – объем эталонной емкости, сильфона и изделия, м<sup>3</sup>;  $P_p$ ,  $P_c$ ,  $P_u$  – давление газа в эталонной емкости, сильфоне и изделии, Па;  $m_p$ ,  $m_c$ ,  $m_u$  - масса газа в эталонной емкости, сильфоне и изделии, кг. Для сильфонного регулирующего органа, соединенного с изделием, горизонтальной трубкой и эталонной емкостью, приведенного на рисунке 6.12, считая объем горизонтальной трубки, входящим в объем эталонной емкости,  $P_c = P_u = P_p$  $= P_{cuc}$  – давления газа в системе, Па;  $m_c + m_u + m_p = m_{cuc}$  - масса газа в системе, кг;  $V_c + V_u + V_p = V_{cuc}$  – объем устройств системы, м<sup>3</sup>.

Уравнение состояния газа для сильфонного регулирующего органа, соединенного с изделием, горизонтальной трубкой и эталонной емкостью принимает вид  $P_{cuc}(V_c + V_u + V_p) = (m_c + m_u + m_p) RT$ .

Когда сильфон 1 сжимается, тогда масса газа в сильфоне 1, изделии 3 и эталонной емкости 6 остается неизменной, а изменяется объем  $V_c$  в суммарном объеме ( $V_c$ +  $V_u$  +  $V_p$ ) и давление газа  $P_{cuc}$ . Поэтому переменными величинами в уравнении состояния газа для сильфона 1, изделия 3 и эталонной емкости 6 являются объем  $V_c$  и давление  $P_{cuc}$ . Если взять производные во времени от переменных величин, тогда получим

$$\frac{1}{\left(m_{c}+m_{u}+m_{p}\right)RT}\frac{dP_{cuc}\left(t\right)}{dt}=-\frac{1}{\left(V_{c}+V_{u}+V_{p}\right)^{2}}\frac{dV_{c}\left(t\right)}{dt}.$$

Если  $(m_c + m_u + m_p) = \rho_c (V_c + V_u + V_p)$  и  $dV_c(t) = -F_c dx_1(t)$ , где  $\rho_c$  – плотность газа кг/м<sup>3</sup>,  $F_c$  – эффективная площадь поперечного сечения сильфона регулирующего органа, тогда получим дифференциальное уравнение давления в сильфонном регулирующем органе, соединенного с изделием, горизонтальной трубкой и эталонной емкостью, в зависимости от перемещения подвижного торца сильфона регулирующего органа в следующем виде

$$\frac{dP_{cuc}(t)}{dt} = \frac{F_c \rho_c RT}{\left(V_c + V_u + V_p\right)} \frac{dx_1(t)}{dt}.$$
(6.21)

Формула (6.21) является также применимой если на рисунке 6.12 изделие 3 и эталонную емкость 6 поменять местами, что соответствует случаю, когда сильфонный регулирующий орган в системе испытаний подключается не к изделию, а к эталонной емкости.

### 6.3.6 Перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке в зависимости от перемещения подвижного торца сильфона регулирующего органа, соединенного с изделием, горизонтальной трубкой и эталонной емкостью

Для определение зависимости между перемещениями подвижного торца сильфона регулирующего органа, соединенного с изделием, горизонтальной трубкой и эталонной емкостью, рассмотрим явления в устройстве, представленном на рисунке 6.12, в установившемся режиме для расходов газа через горизонтальную трубку. Это условие позволяет не учитывать дифференциальное уравнение движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке (3.173).

Из рисунка 6.12 следует, что изменение расхода газа  $\Delta Q_1(t)/\Delta t$ , м<sup>3</sup>/с, который зависит от движения подвижного торца сильфонного регулирующего органа, создает изменение расхода газа, который поступает в изделие  $\Delta Q_2(t)$ , м<sup>3</sup>/с, и расхода газа, поступающего в эталонную емкость через горизонтальную трубку,  $\Delta Q_3(t)$ , м<sup>3</sup>/с, то есть,

$$\Delta Q_1(t) = \Delta Q_2(t) + \Delta Q_3(t). \tag{6.22}$$

Изменения расходов газа  $\Delta Q_1(t)$  и  $\Delta Q_3(t)$  определим по выражениям:

$$\Delta Q_1(t) = F_c \frac{\Delta x_1(t)}{\Delta t}, \qquad \Delta Q_3(t) = \frac{\pi d_{mp}^2}{4} \frac{\Delta x_2(t)}{\Delta t}, \tag{6.23}$$

где  $F_c$ ,  $d_{mp}$  – эффективная площадь поперечного сечения сильфона регулирующего органа, м<sup>2</sup>, и диаметр горизонтальной трубки, м.

Определим расход  $\Delta Q_2(t)$ . До начала перемещения подвижного торца сильфонного регулирующего органа 1 давление газа в изделии 3 (рисунок 6.12) равно  $P_u(t)$ , объем изделия  $V_u$  и масса газа, находящегося в изделии, равна  $m_u(t)$ , то есть,

$$P_u(t) V_u = m_u(t) RT$$
, откуда  $m_u(t) = P_u(t) V_u/RT$ . (6.24)

После перемещения подвижного торца сильфонного регулирующего органа 1 давление газа в изделии 3 и во всех устройствах системы изменяется согласно выражению (6.21), которое в приращениях имеет вид

$$\frac{\Delta P_{cuc}(t)}{\Delta t} = \frac{F_c \rho_2 RT}{\left(V_c + V_u + V_p\right)} \frac{\Delta x_1(t)}{\Delta t}.$$

Из этого выражения определяем, что

$$\Delta P_{cuc}(t) = \Delta P_u(t) = \frac{F_c \rho_c RT}{\left(V_c + V_u + V_p\right)} \Delta x_1(t).$$
(6.25)

Уравнение состояния газа для изделия 3 (рисунок 6.12) в этом случае, когда в изделие поступила часть воздуха от смещения подвижного торца регулирующего органа, принимает вид

$$[P_u(t) + \Delta P_u(t)] V_u = [m_u(t) + \Delta m(t)] RT.$$

Вычитая из этого выражения соотношение  $P_u(t) V_u = m_u(t) RT$ , получим

$$\Delta P_u(t) V_u = \Delta m_u(t) RT.$$

После подстановки в это выражение (6.25)

$$\Delta m_u(t) = \frac{F_c \rho_c V_u}{\left(V_c + V_u + V_p\right)} \Delta x_1(t) \,.$$

Разделив обе части выражения на  $\Delta t$  и  $\rho_{2}$ , получим

$$\frac{\Delta m_u(t)}{\Delta t} = \Delta G_2(t) = \frac{F_c \rho_c V_u}{\left(V_c + V_u + V_p\right)} \frac{\Delta x_1(t)}{\Delta t} \quad \text{ИЛИ} \quad \Delta Q_2(t) = \frac{F_c V_u}{\left(V_c + V_u + V_p\right)} \frac{\Delta x_1(t)}{\Delta t}.$$
(6.26)

После подстановки в (6.22) выражений (6.23) и (6.26) получим

$$F_c \frac{\Delta x_1(t)}{\Delta t} - \frac{F_c V_u}{\left(V_c + V_u + V_p\right)} \frac{\Delta x_1(t)}{\Delta t} = \frac{\pi d_{mp}^2}{4} \frac{\Delta x_2(t)}{\Delta t}$$

ИЛИ

$$x_{2}(t) = \frac{4F_{c}}{\pi d_{mp}^{2}} \left[ 1 - \frac{V_{u}}{\left(V_{c} + V_{u} + V_{p}\right)} \right] x_{1}(t) .$$
(6.27)

Это выражение устанавливает зависимость между перемещением жидкостного поршня в горизонтальной трубке и перемещением подвижного торца сильфона регулирующего органа, соединенного с изделием, горизонтальной трубкой и эталонной емкостью устройства контроля герметичности изделий.
Если регулирующий орган 1 (рисунок 6.12) присоединить не к изделию 3, а к эталонной емкости 6, тогда выражение (6.27) принимает вид

$$x_{2}(t) = \frac{4F_{c}}{\pi d_{mp}^{2}} \left[ 1 - \frac{V_{p}}{(V_{c} + V_{u} + V_{p})} \right] x_{1}(t) .$$

#### 6.3.7 Выбор сильфона исполнительного устройства САУ амплитудой периодических возмущений давления пробной среды

Металлические сильфоны, выпускаемые промышленными предприятиями, имеют [88] наружный диаметр от 4,5 до 160 мм, толщину стенки от 0,08 до 0,25 мм, число волн (гофров) от 4 до 16. Выбираем, например, сильфон с наружным диаметром  $d_2 = 30$  мм, внутренним диаметром -  $d_1 = 15$  мм, длиной  $L_c$ = 100 мм, максимальным ходом подвижного торца сильфона  $\lambda_{max} = 20$  мм, толщиной стенки  $\delta_c = 0,20$  мм и числом гофров n = 10.

Эффективная площадь сильфона  $F_c$ , м<sup>2</sup>, [88]

$$F_c = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_1}{2}\right)^2.$$
 (6.28)

Для рассматриваемого примера  $F_c = (\pi/4) \cdot [(30 + 15)/2]^2 = 397,6 \text{ мм}^2$ . Объем сильфона  $V_c = F_c L_c = 397,6 \cdot 100 = 39760 \text{ мм}^3$ . Проверим, удовлетворяет ли выбранный сильфон в отношении перемещений жидкостного поршня в горизонтальной трубке. То есть, определим перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке различных диаметров в зависимости от перемещения подвижного торца сильфона, а затем определим перемещение торца сильфона, при котором сила, действующая на жидкостный поршень, превышала бы силу, зависящую от сил поверхностного натяжения жидкости в трубке.

Принимаем объем изделия  $V_u = 0,004 \text{ м}^3$ ; объем эталонной емкости  $V_p = 0,04 \text{ м}^3$ ; объем сильфона  $V_c = 0,000039760 \text{ м}^3$ . По формуле (6.27) определяем, что при перемещении подвижного торца сильфона  $x_1(t) = 1 \text{ мм}$  перемещение жидкостного поршня составляет: а) в горизонтальной трубке диаметром  $d_{mp} = 2 \text{ мм} x_2(t) = 115 \text{ мм}$ ; б) в горизонтальной трубке диаметром  $d_{mp} = 4 \text{ мм} x_2(t) = 28,8 \text{ мм}$ ; в) в горизонтальной трубке диаметром  $d_{mp} = 6 \text{ мм} x_2(t) = 12,8 \text{ мм}$ .

Если происходит полное перемещение подвижного торца сильфона  $x_1(t) = 20$  мм, тогда перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке  $d_{mp} = 6$  мм составляет  $x_2(t) = 256$  мм, а в горизонтальной трубке  $d_{mp} = 4$  мм - 576 мм.

Определим, какой перепад давлений создается на жидкостном поршне горизонтальной трубки  $\Delta P_{n/\mathscr{K}}(t)$ , Па, при перемещение подвижного торца сильфона  $\Delta x_1(t) = 1$  мм. Принимаем, что жидкостный поршень 5 (рисунок 6.12) жестко зафиксирован.

Для этого условия изменение давления в системе устройств необходимо определять по формуле (6.25) при  $V_p = 0$ , которая принимает вид

$$\Delta P_{cuc}(t) = \frac{F_c \rho_c RT}{\left(V_c + V_u\right)} \Delta x_1(t) \,. \tag{6.29}$$

Если  $F_c = 397,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ ;  $\rho_c = 0,127 \text{ кг/m}^3$ ;  $V_c = 39760 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$ ;  $V_u = 0,004 \text{ m}^3$ ; газовая постоянная для воздуха  $R = 29,27 \text{ m}^2/(\text{c}^2 \cdot \text{K})$  [62];  $\Delta x_1(t) = 1 \text{ мм}$ , тогда  $\Delta P_{cuc}(t) = \Delta P_{n/cuc}(t) = 108,3 \text{ Па}.$ 

Перепад давлений, который создается на жидкостном поршне в горизонтальной трубке за счет сил поверхностного натяжения,  $\Delta P_n$  Па, определяется по формуле Лапласа  $\Delta P_n = 4\sigma_{\mathcal{H}}/d_{mp}$ , где  $\sigma_{\mathcal{H}}$  – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;  $d_{mp}$  - диаметр горизонтальной трубки с жидкостным поршнем, м. Для воды  $\sigma_{\mathcal{H}} = 72,5 \cdot 10^{-3}$  Н/м и для горизонтальной трубки  $d_{mp} = 2$  мм  $\Delta P_n = 145,0$  Па,  $d_{mp} = 4$  мм  $\Delta P_n = 72,5$  Па, а для трубки  $d_{mp} = 6$ мм  $\Delta P_n = 48,3$  Па.

Таким образом, перемещение подвижного торца сильфона на  $x_1(t) = (1,0-1,5)$  мм обеспечивает смещение жидкостного (водяного) поршня в горизонтальной трубке, преодолевая действие поверхностного натяжения жидкости.

Объем газа, который должен выйти из изделия как утечки при контроле герметичности, чтобы создать перепад давлений на жидкостном поршне за счет сил поверхностного натяжения, соответствует, как установлено выше, перемещению подвижного торца сильфона на (1,0 - 1,5) мм. В этом случае объем газа

$$V_{2} = V_{vmeyek} = F_{c} \cdot x_{1}(t) = F_{c} \cdot (1,0 - 1,5) = (397,6 - 596,4) \text{ MM}^{3}.$$

Возникает вопрос, с какой точностью измеряется объем (утечки) газа, равный (397,6 – 596,4) мм<sup>3</sup>, при возмущениях по перемещению жидкостного поршня в горизонтальной трубке. Перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке емкостными измерительными преобразователями воспринимается с точностью 0,5 мм вполне успешно. Если диаметр горизонтальной трубки  $d_{mp}$ = 4 мм, тогда объем газа на перемещении жидкостного поршня на 0,5 мм составляет  $\pi \cdot 4^2 \cdot 0,5 = 25,1$  мм<sup>3</sup>, для  $d_{mp} = 2$  мм этот объем составляет 6,28 мм<sup>3</sup>. Если 397,6 мм<sup>3</sup> это 100 %, тогда 6,28 мм<sup>3</sup> составляет 1,58 %. Если 596,4 мм<sup>3</sup> - 100 %, тогда 6,28 мм<sup>3</sup> – 1,05 %. Таким образом, контроль герметичности изделий в зоне действия сил поверхностного натяжения жидкости в горизонтальной трубке производится с точностью (1,0–1,5) %.

Для изделий класса герметичности А, например, затворов трубопроводной арматуры утечки газа из изделия не допускаются, но точность измерения согласно ГОСТ 9544-93 [6] должна составлять 0,01 см<sup>3</sup>/мин. Таким образом, погрешность измерения утечек горизонтальной трубкой, равная 6,28 мм<sup>3</sup>, меньше, требуемой стандартом погрешности измерений и равной 10 мм<sup>3</sup>.

#### 6.3.8 Выбор электромагнита исполнительного устройства САУ амплитудой периодических возмущений давления

На подвижный торец сильфона 4 электромагнитного сильфонного исполнительного устройства (рисунок 6.13) действует сила *N<sub>C</sub>*, H,

$$N_c = F_c (P_c - P_k) + x_1 C_c, (6.30)$$

где  $F_c$  – эффективная площадь сильфона, определяемая по выражению (6.28), м<sup>2</sup>;

*P<sub>c</sub>*, *P<sub>к</sub>* - давление газа в сильфоне (изделии, испытываемом на герметичность) и давление газа в камере 2 (рисунок 6.13), Па;

 $x_1$  – перемещение подвижного торца сильфона, м;

 $C_c$  – жесткость сильфона, Н/м.



Рисунок 6.13 – К расчету силы, приложенной к якорю электромагнитного сильфонного исполнительного устройства

Давление внутри сильфона  $P_c$ , принимается большим, чем давление в камере  $P_{\kappa}$  потому, что в исходном состоянии эти давления равны, а при сжатии сильфона 4 (рисунок 6.13) давление в камере 2 понижается, а в сильфоне (и в изделии) повышается. На подвижный торец сильфона действует разность давлений  $\Delta P_c = P_c - P_{\kappa}$ .

Определим разность давлений, действующую на подвижный торец сильфона, в зависимости от объемов сильфона  $V_c$ , присоединенного к сильфону изделия объемом  $V_u$ , объема камеры  $V_\kappa$ , в которой размещено исполнительное сильфонное устройство, начальных значений давлений среды в камере, сильфоне и изделии  $P_0 = P_{\kappa} = P_u = P_c$  и перемещения  $x_1$  подвижного торца сильфона.

В исходном состоянии, когда исполнительное устройство и изделие заполнены газом при давлении  $P_0 = P_{\kappa} = P_u = P_c$ , уравнение состояния газа имеет вид:

а) для камеры 2 (рисунок 6.13), в которой расположено исполнительное устройство,  $P_0 V_{\kappa} = m_{\kappa} RT$ ;

б) для сильфона и присоединенного к нему изделия  $P_0 (V_c + V_u) = (m_c + m_u) RT$ .

Когда подвижный торец сильфона смещается на расстояние  $x_1$ , тогда объем камеры увеличивается на  $F_c \cdot x_1$ , ( $F_c - эффективная$  площадь поперечного сечения сильфона), а объем сильфона уменьшается на  $F_c \cdot x_1$  и уравнения состояния газа имеют вид:

а) для камеры, в которой расположено исполнительное устройство,  $P_{\kappa}(V_{\kappa} + F_{c} \cdot x_{1}) = m_{\kappa}RT$ , где  $m_{\kappa} = P_{0}V_{\kappa}/RT$ ;

б) для сильфона и присоединенного к нему изделия  $P_c (V_c - F_c \cdot x_1 + V_u) = (m_c + m_u) RT$ , где  $(m_c + m_u) = P_0 (V_c + V_u)/RT$  или получим:

а) для камеры, в которой расположено исполнительное устройство,  $P_{\kappa}(V_{\kappa} + F_{c} \cdot x_{1}) = P_{0}V_{\kappa}$ ;

б) для сильфона и присоединенного к нему изделия  $P_c (V_c - F_c \cdot x_1 + V_u) = P_0 (V_c + V_u).$ 

Разность давлений

$$\Delta P_c = P_c - P_\kappa = P_0 \left[ \frac{V_c + V_u}{V_c - F_c x_1 + V_u} - \frac{V_\kappa}{V_k + F_c x_1} \right].$$
(6.31)

Выше расчетами установлено, что при перемещении подвижного торца выбранного сильфона на 1 мм жидкостный поршень перемешается на  $x_2(t)$ , а именно:

а) в горизонтальной трубке диаметром  $d_{mp} = 2$  мм  $x_2(t) = 115$  мм;

б) в горизонтальной трубке диаметром  $d_{mp} = 4$  мм  $x_2(t) = 28,8$  мм;

в) в горизонтальной трубке диаметром  $d_{mp} = 6$  мм  $x_2(t) = 12,8$  мм.

Допустим, что возмущения в перемещении жидкостного поршня в горизонтальной трубке составляют 100 мм (такое значение принималось выше при теоретическом анализе возмущений на фазовой плоскости). В этом случае максимальное перемещение подвижного торца сильфона  $x_1$  (при использовании горизонтальной трубки диаметром 6 мм) составит 100/12,8 = 7,81 мм.

Принимаем, например,  $x_1 = 10$  мм (половину полного хода принятого сильфона, равного 20 мм), объем изделия  $V_u = 0,004 \text{ м}^3$ ; объем камеры исполнительного устройства  $V_{\kappa} = 0,004 \text{ м}^3$ ; начальное испытательное давление газа в устройстве контроля герметичности  $P_0 = 0,15$  МПа. Для этих данных при  $F_c = 397,6 \text{ мм}^2$  и  $V_c = 39760 \text{ мм}^3$  по формуле (6.31) определяем, что

=296,72 Па.

Сила от действия этого давления  $N_c^1 = (P_c - P_\kappa)F_c = 296,72 \cdot 397,6 \cdot 10^{-6} = 0,118$  Н.

Определим жесткость сильфона *C<sub>c</sub>*, Н/м. Жесткость сильфона при нагружении его сосредоточенной силой можно определить по формуле [89]

$$C_c = \frac{N_c}{\lambda_{\text{max}}} = \frac{E\delta_c^3}{2nA_p R_{\scriptscriptstyle H}^2},\tag{6.32}$$

где *E* - модуль упругости материала сильфона, кг/м<sup>2</sup>, (для сильфонов используется, например, нержавеющая сталь [88] 1Х18Н9Т, для которой [70]  $E = 2,07 \cdot 10^6$  кг/см<sup>2</sup> =  $2,07 \cdot 10^{10}$  кг/м<sup>2</sup>);

 $\delta_c$  – толщина стенки сильфона, м, ( $\delta_c = 0,20$  мм =  $0,2 \cdot 10^{-3}$  м);

n – число гофров сильфона (n = 10);

 $R_{\rm H}$  – наружный радиус сильфона, м,  $(R_{\rm H} = d_2/2 = 30/2 = 15 \text{ мм} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м});$ 

А<sub>р</sub> – коэффициент, который определяется по выражению [89]

$$A_{p} = \frac{3(1-\mu^{2})}{4\pi} \left[ \frac{c^{2}-1}{c^{2}} - \frac{4\ln^{2}c}{c^{2}-1} \right],$$
(6.33)

где *µ* – коэффициент Пуассона, который для сталей [70] *µ*=0,25-0,30;

c – отношение наружного  $d_2$  к внутреннему  $d_1$  диаметру сильфона (c = 30/15 = 2,0).

$$A_{p} = \frac{3(1-0,3^{2})}{4\pi} \left[ \frac{2^{2}-1}{2^{2}} - \frac{4\ln^{2}2}{2^{2}-1} \right] = 0,02378;$$
$$C_{c} = \frac{2,07 \cdot \cdot 10^{10} \cdot (0,2 \cdot 10^{-3})^{3}}{2 \cdot 10 \cdot 0,02378 \cdot (15 \cdot 10^{-3})^{2}} = 1547, 52 \text{ H/m}^{2}.$$

На подвижный торец сильфона 4 электромагнитного сильфонного исполнительного устройства (рисунок 6.13) действует сила *N*<sub>C</sub>, H,

$$N_c = F_c (P_c - P_k) + x_1 C_c = 397,6 \cdot 10^{-6} \cdot 296,72 + 20 \cdot 10^{-3} \cdot 1547,52 = 31,06 \text{ H},$$

ИЛИ

31,06 · 0,102 = 3,17 кг.

Выбираем электромагнит общепромышленного назначения на постоянном токе [90] типа КМП-2, который имеет: тяговое усилие 3,5 кг, потребляемую мощность 90 Вт, время полного втягивания (отталкивания) – 0,2 с, время отпадания – 0,1 с, полный ход – 20 мм.

6.3.9 Передаточная функция электромагнита исполнительного устройства САУ амплитудой периодических возмущений давления

Поступательное перемещение якоря электромагнита описывается дифференциальным уравнением [90]

$$m_{g} \frac{d^{2}x_{1}(t)}{dt^{2}} + b \frac{dx_{1}(t)}{dt} + C_{m}x_{1}(t) = Ai(t) \pm Bx_{1}(t), \qquad (6.34)$$

где  $x_1(t)$  – перемещение якоря электромагнита, м;

*m*<sub>я</sub> – масса якоря электромагнита, кг;

*b* – размерный коэффициент, характеризующий демпфирование при перемещении якоря электромагнита, H·c/м;

 $b \cdot [dx_1(t)/dt]$  – сила, противодействующая перемещению якоря электромагнита и зависящая от скорости движения якоря, H;

 $C_m \cdot x_1(t)$  - сила, противодействующая перемещению якоря электромагнита и зависящая от перемещения якоря, H;

*C<sub>m</sub>* - размерный коэффициент, характеризующий противодействие перемещению якоря электромагнита, Н/м;

*i*(*t*) – электрический ток, проходящий по обмотке электромагнита, а;

 $Ai(t) \pm Bx_1(t) = F_3(t)$  - сила, приложенная к якорю электромагнита и зависящая от силы тока, проходящего по обмотке электромагнита, и перемещения якоря, H;

*А*, *В* – размерные коэффициенты, характеризующие силу, приложенную к якорю электромагнита и зависящую от силы тока, проходящего по обмотке электромагнита, и перемещения якоря, Н/А, Н/м.

Статическая характеристика, в соответствии с уравнением (6.34), имеет вид

$$C_m x_1(t) = Ai(t) \pm Bx_1(t); \quad (C_m \mp B)x_1(t) = Ai(t); \quad x_1(t) = \frac{A}{(C_m \mp B)}i(t), \quad (6.35)$$

где  $C_m \mp B = C_{2}$  - эквивалентная жесткость электромагнита, кг/с<sup>2</sup> или Н/м.

Передаточная функция перемещения якоря электромагнита от тока, проходящего по обмотке, в соответствии с (6.34) имеет вид [90]

$$W_{x/i}(s) = \frac{A}{C_{3}\left(\frac{1}{\omega_{0}^{2}}s^{2} + 2\frac{\xi}{\omega_{0}}s + 1\right)},$$
(6.36)

где  $C_3$  - эквивалентная жесткость, кг·с<sup>2</sup>, электромагнита  $C_3 = C_m \mp B$ ;

 $\omega_0$  – собственная круговая частота колебаний подвижной системы электромагнита, с<sup>-1</sup>,  $\omega_0 = \sqrt{C_2/m_g}$ ;

 $\xi$  – коэффициент демпфирования подвижной системы электромагнита,  $\xi = b/2\sqrt{m_{g}C_{g}}$ .

В передаточной функции (6.36) коэффициент усиления *А*/*C*<sub>э</sub> определим по выражению (6.35) для условия, когда ток по обмотке электромагнита и перемещение якоря электромагнита имеют максимальные значения

$$\frac{A}{C_{\mathfrak{I}}} = \frac{x_{1\max}(t)}{i_{\max}(t)}.$$

Максимальное перемещение якоря принятого электромагнита типа КМП-2 составляет 20 мм, потребляемая мощность 90 Вт и время полного втягивания (отталкивания) – 0,2 с.

При напряжении питания 110 В постоянного тока максимальное значения потребляемого электромагнитом тока  $i_{max} = 90/110 = 0.818$  А и коэффициент усиления в передаточной функции (6.36)  $A/C_{9}=20\cdot 10^{-3}/0.818 = 0.01636$  м/А.

Обычно  $1/\omega_0 = T_3$  – постоянная времени электромагнита, с. Принимаем постоянную времени принятого электромагнита КМП-2 равной времени полного втягивания (отталкивания) якоря 0,2 с, то есть,  $T_3 = 0,2$  с и частота  $\omega_0 = 5$  Гц.

Коэффициент демпфирования, согласно [90], для электромагнитов находится в пределах от 0,1 до 0,5. Верхний предел соответствует случаю специального демпфирования якоря. В электромагнитном сильфонном исполнительном механизме якорь в достаточной степени демпфируется жесткостью сильфона и перепадом давлений газа, приложенного к подвижному торцу сильфона и, фактически, к якорю электромагнита.

Поэтому в системах автоматического управления амплитудой периодических возмущений с использованием электромагнитного сильфонного исполнительного устройства принимаем, что  $\xi = 0.5$ .

Передаточная функция для выбранного электромагнита типа КМП-2 электромагнитного сильфонного исполнительного устройства принимает вид

$$W_{x/i}(s) = \frac{0,01636}{(0,04s^2 + 0,20s + 1)}.$$
(6.37)

### 7 РАЗРАБОТКА СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

### 7.1 Принципы управления и построения автоматизированных систем испытаний изделий на герметичность

При построении систем автоматического управления используют общие принципы управления, которые определяют, «каким образом осуществляется увязка алгоритмов управления с фактическим функционированием или причинами, вызывающими отклонение функционирования от заданного» [79].

На основе приведенных выше теоретических исследованиях и рассмотрения известных общих принципов управления и построения автоматизированных систем установлено, что известные принципы не полностью удовлетворяют требованиям по созданию автоматизированных систем управления испытаниями изделий на герметичность пузырьковым, манометрическим и гидростатическим методами.

Рассмотрим предложенные принципы и положения необходимые для создания автоматизированных систем управления испытаниями изделий на герметичность пузырьковым, манометрическим и гидростатическим методами.

7.1.1 Принцип неразделимости испытаний изделий на герметичность и повышения ресурса герметичности изделий

Проблема испытаний изделий на герметичность – это двуединая проблема повышения экономической эффективности, одна из которых охватывает проектирование и изготовление технологического оборудования испытаний, систем автоматизации и непосредственные испытания изделий на герметичность, а другая – исследование причин негерметичности изделий после их производства и в условиях эксплуатации и повышение ресурса герметичности изделий.

Из этого следует необходимость создания теории повышения ресурса герметичности изделий. В работе в качестве примера исследованы теоретически и экспериментально причины негерметичности одних из наиболее распространенных конструкций – клапанов гидравлических систем испытаний.

7.1.2 Принцип соответствия точности автоматизированных систем испытаний на герметичность классам герметичности изделий

Автоматизированные системы испытаний изделий на герметичность по точности проектируются применительно к конкретному классу или нескольким классам герметичности испытываемых изделий с заданным интервалом требований по точности. Не рационально разрабатывать, например, одну систему автоматического управления для испытаний затворов трубопроводной арматуры классов герметичности A, B, C и D для всей номенклатуры изделий классифицируемой по условному диаметру.

Отсюда требования – любые испытываемые на герметичность изделия должны быть отнесены к какому то классу или группе классов герметичности, а с другой стороны необходимо установить классы или интервалы по точности

для систем автоматизации испытаний в соответствии с классами герметичности изделий.

7.1.3 Принцип оптимизации типов и вариантов САУ испытаний изделий на герметичность

Принцип оптимизации типов и вариантов САУ испытаний изделий на герметичность состоит в том, что должны создаваться типовые САУ испытаниями изделий: по методу испытаний и способу его реализации, по точности, по типу пробной среды, по типу изделий. Например, мобильная система на автомобиле «Урал» для испытаний на герметичность газовых магистральных трубопроводов.

7.1.4 Принцип контроля герметичности изделия при постоянном испытательном давлении

Обычно, например, при манометрическом методе испытаний изделий оценка герметичности изделия проводится по снижению давления в изделии за время испытаний. При понижении давления пробной среды в изделии утечки пробной среды уменьшаются. При испытаниях каждого конкретного изделия это снижение давления имеет различное значение. Отсюда следует, что сопоставить изделия по герметичности по утечкам среды вообще невозможно, то есть, утечки среды из изделия не сопоставимы. Поэтому целесообразно испытания изделий проводить при постоянном давлении путем подвода в них дополнительных порций пробной среды во время испытаний.

7.1.5 Принцип автоматизированного контроля герметичности изделий при специально генерируемых в устройстве испытаний периодических возмущений по управляемому или взаимосвязанному параметру

Основная сущность принципа состоит в том, что:

- контроль герметичности изделий проводится при специально генерируемых в устройстве испытаний периодических возмущений по управляемому или взаимосвязанному параметру с постоянной амплитудой;

- общее значение параметра, по которому делают заключение о герметичности изделия, определяют как разность соответствующих амплитуд параметра в промежутках между возмущениями через заданное число периодов возмущений в устройстве испытаний, например, по перемещению жидкостного поршня в горизонтальной трубке.

7.1.6 Усовершенствованный принцип управления по отклонению, а именно: принцип управления по отклонению параметра в промежутках между специально генерируемыми в объекте управления (или другом устройстве) периодическими возмущениями по управляемому или взаимосвязанному параметру

Сущность этого принципа состоит в том, что при регулировании параметра с гистерезисом в объект управления (или другое устройство) генерируются периодические возмущения с заданной паузой (с постоянным сдвигом между возмущениями) по управляемому или взаимосвязанному параметру, получение информации от измерительного преобразователя управляемого параметра и выдача управляющих сигналов на исполнительный механизм системы управления производится в промежутках между возмущениями. 7.1.7 Принцип специфики технологических процессов испытаний изделий на герметичность, для которых необходима разработка специальной теории построения систем автоматизированного контроля герметичности и систем автоматизации испытаний изделий

Этот принцип базируется на известном принципе взаимодействия общего и конкретного в САУ, общей теории и практики по САУ и конкретных теоретических и экспериментальных исследованиях по специальным технологическим процессам. Из этого и вытекает необходимость создания теории автоматизации применительно к технологическим процессам испытаний изделий на герметичность.

На основании рассмотренных принципов разработаны структуры построения автоматизированных систем испытаний изделий на герметичность. На рисунках 7.1, 7.2 и 7.3 приведены, например, структурные схемы построения автоматизированных систем испытаний изделий на герметичность манометрическим, гидростатическим или пузырьковым методом.

# 7.2 Системы автоматизированного контроля герметичности изделий с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством

# 7.2.1 Система автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и пузырьковой камеры

На рисунке 7.4 приведена функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом пузырьковым методом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и пузырьковой камеры. Автоматизированные системы управления испытаниями изделий на герметичность манометрическим или гидростатическим методом

Системы автоматизированного контроля герметичности изделий манометрическим или гидростатическим методом

Система генерирования периодических возмущений давления в устройстве испытаний изделий на герметичность Система автоматического из-Система автоматического из-

мерения объема газа (жидкости), подаваемого в изделие для компенсации утечек при испытаниях на герметичность

Система автоматического восстановления первоначального давления газа (жидкости) в испытываемом изделии путем подачи в изделие газа (жидкости), равного объему утечек

Системы автоматизации подготовительно-заключительных операций испытаний изделий на герметичность

Системы автоматизации вспомогательных устройств и механизмов, обеспечивающих испытания изделий, например, компрессоров, гидравлических насосных агрегатов

### Рисунок 7.1

Автоматизированные системы управления испытаниями изделий на герметичность газом (жидкостью) пузырьковым методом Системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом (жидкостью) пузырьковым методом с использованием пузырьковой камеры генерирования Система периодических Система автоматическовозмущений давления в устройстве исго управления амплитупытаний излелий на герметичность дой возмущений уровня жидкости в барботажной Система автоматического учета количества трубке пузырьковой капузырьков газа, выходящих из барботажной меры в устройстве испытрубки в жидкость пузырьковой камеры и таний изделий на гермеопределения объема утечек газа (жидкости) при испытаниях на герметичность тичность Системы автоматизации под-Системы автоматизации вспомогательных готовительно-заключительных устройств и механизмов, обеспечивающих испытания изделий, например, компрессоопераций испытаний изделий ров, гидравлических насосных агрегатов на герметичность

Рисунок 7.2

Автоматизированная система управления испытаниями изделий на герметичность газом манометрическим методом с использованием горизонтальных трубок с жидкостным поршнем

| Система автоматизированного контроля герметичности изделий газом манометрическим методом с использованием горизонтальных трубок                    |  |
|--|--|
| Система генерирования перио-<br>дических возмущений давле-<br>ния в устройстве с горизон-<br>тальной трубкой испытаний<br>изделий на герметичность | Система автоматического управления<br>амплитудой возмущений давления<br>газа в устройстве испытаний по пе-<br>ремещениям жидкостного поршня в<br>первой горизонтальной трубке                          |
| Система автоматического измерения объема газа, пода-<br>ваемого в изделие для ком-<br>пенсации утечек газа при ис-<br>пытаниях на герметичность    | Система автоматического восстановле-<br>ния первоначального положения жидко-<br>стного поршня во второй горизонтальной<br>грубке путем подачи в испытываемое из-<br>делие газа (равного объему утечек) |
|  |  |
| Системы автоматизации подго-<br>товительно - заключительных<br>операций испытаний изделий<br>на герметичность                                      | Системы автоматизации вспомога-<br>тельных устройств и механизмов,<br>обеспечивающих испытания изделий,<br>например, компрессоров, гидравличе-<br>ских насосных агрегатов                              |

#### Рисунок 7.3

Эта система автоматизированного контроля герметичности изделий содержит: систему автоматического генерирования периодических возмущений уровня жидкости в барботажной трубке; систему автоматического управления амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке по верхнему уровню жидкости в барботажной трубке и систему автоматического учета количества пузырьков газа, проходящих через пузырьковую камеру при возмущениях уровня жидкости в барботажной трубке до нижнего среза, по суммарному объему которых делают заключение о герметичности изделия.

Система автоматизированного контроля герметичности изделий газом пузырьковым методом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и пузырьковой камеры содержит: эталонную емкость 1; вентили 2,17, 18, 19, 20, 21; герконовые выключатели 3 и 10; регулируемый упор 4; толкатель с круглой головкой 5; цилиндрический редуктор 6 и 13; электрический двигатель 7 и 12; диск 8; качающийся рычаг 9; упругую емкость 11; возвратно-поступательный шарнир 14 качающего рычага 9; червячный редуктор 15; изделие 16, испытываемое на герметичность; регулирующий блок 22; усилитель 23; показывающий прибор отклонения уровня жидкости в барботажной трубке от верхнего заданного значения 24; задатчик 25; емкостный измерительный преобразователь 26 уровня жидкости в барботажной трубке; счетчик пузырьков газа 27; емкостный измерительный преобразователь 28 пузырьков газа, формируемых на нижнем срезе барботажной трубки.



Рисунок 7.4 – Функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и пузырьковой камеры

Система автоматического управления амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке по верхнему уровню жидкости в ней обеспечивает постоянство разности высот перемещения уровня жидкости в барботажной трубке от верхнего поддерживаемого системой управления уровня до нижнего среза барботажной трубки.

Если изделие герметично и нет утечек пробного газа из изделия 16 в атмосферу, тогда изменение уровня жидкости в барботажной трубке при возмущениях должно происходить от верхнего значения до нижнего среза трубки. Если уровень жидкости при этих возмущениях не доходит до верхнего значения, тогда система управления восстанавливает заданное верхнее значение уровня путем дополнительной подачи газа в эталонную емкость 1 с помощью сильфонного регулирующего органа (упругой емкости) 11.

Работа системы автоматического управления уровнем жидкости в барботажной трубке происходит следующим образом. Когда при вращении диска 8, например, по часовой стрелке, толкатель с круглой головкой 5 выходит из зацепления с качающимся рычагом 9 потому, что этот рычаг упирается в упор 4, тогда при вращении диска 8 не происходит вынужденного изменения давления в устройствах испытаний и уровня жидкости в барботажной трубке. Герконовый выключатель 10 подает сигнал на регулирующий блок и не пропускает управляющие сигналы на исполнительный механизм 12, когда толкатель с круглой головкой 5 входит в зацепление с качающимся рычагом 9 и поворачивает его. Выключатель 3 подает сигнал на регулирующий блок и пропускает управляющие сигналы на исполнительный механизм 12, когда толкатель с круглой головкой 5 выходит из зацепления с качающимся рычагом 9 и не поворачивает его.

Сигнал от емкостного измерительного преобразователя 26 уровня жидкости в барботажной трубке 29 подается в усилитель 23, где сравнивается с сигналом задания уровня, поступающего от задатчика 25. Регулирующий блок 22 отрабатывает по заданному закону управления (ПИ или ПИД) управляющий сигнал и, при наличии сигнала от герконового выключателя 3, подает на электрический моторный исполнительный механизм 12. Исполнительный механизм через цилиндрический 13 и червячный 15 редукторы перемещает возвратнопоступательный шарнир 14 с качающимся рычагом 9.

При перемещении возвратно-поступательного шарнира 14 с качающимся рычагом 9 влево происходит уменьшение плеча рычага 9, воздействующего на перемещение подвижной части упругой емкости 11, и уровень жидкости в барботажной трубке понижается, амплитуда возмущений давления газа в устройствах испытаний и возмущений уровня жидкости в барботажной трубке уменьшаются. При перемещении возвратно-поступательного шарнира 14 с качающимся рычагом 9 вправо происходит увеличение плеча рычага 9, воздействующего на перемещение подвижной части упругой емкости 11, и уровень жидкости в барботажной трубке отвующего на перемещение подвижной части упругой емкости 11, и уровень жидкости в барботажной трубке повышается, амплитуда возмущений давления газа в устройствах испытаний и возмущений уровня жидкости в барботажной трубке повышается, амплитуда возмущений давления газа в устройствах испытаний и возмущений уровня жидкости в барботажной трубке повышается, амплитуда возмущений давления газа в устройствах испытаний и возмущений уровня жидкости в барботажной трубке повышается.

Система автоматизации испытаний изделий с использованием пузырьковой камеры воплощает все рассмотренные в третьем разделе теоретические положения, а именно:

- положение о том, что необходимо снижать уровень в барботажной трубке до нижнего среза иначе при большой степени герметичности изделия уровень жидкости в трубке может не понижаться до нижнего среза и не появятся пузырьки газа в жидкости пузырьковой камеры;

- что основные потери давления приходятся на формирование пузырьков газа на нижнем срезе барботажной трубки и эти потери давления должны прикладываться из вне;

- что потери на трение жидкости при движении в барботажной трубке могут компенсироваться принудительным ее движением;

- что для разрешения проблемы с временем переходного процесса (оно уходит в бесконечность при герметичных изделиях) необходимо создавать принудительный расход газа через пузырьковую камеру.

На рисунке 7.5 приведена функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом пузырьковым методом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством, пузырьковой камеры и дифманометра, которая содержит:

- систему автоматического управления амплитудой возмущений давления в эталонной емкости и дополнительной емкости и

- систему автоматического подсчета количества и суммарного объема пузырьков газа, проходящих через жидкость пузырьковой камеры при возмущениях уровня жидкости в барботажной трубке до нижнего среза.

Система автоматизированного контроля герметичности изделий (рисунок 7.5) содержит дополнительную емкость 1; эталонную емкость 2; вентили 3, 26, 27, 28, 29, 17, 18, 19, 20, 24; герконовые выключатели 4 и 11; регулируемый упор 5; толкатель 6; цилиндрический редуктор 7 и 15; электрический двигатель 8; диск 9; качающийся рычаг 10; упругую емкость 12; реверсивный электрический двигатель 13; возвратно-поступательный шарнир 14 качающего рычага 10; червячный редуктор 16; дифференциальный манометр 21; показывающий прибор амплитуды возмущений давления 22; регулирующий блок 23; изделие 25; барботажную трубку 30; пузырьковую камеру 31; счетчик пузырьков газа 32; емкостный измерительный преобразователь 33 пузырьков газа.

# 7.2.2 Система автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и горизонтальной трубки

На рисунке 7.6 приведена функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом манометрическим методом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и двух горизонтальных трубок, а на рисунке 7.7 - функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством, дифференциального манометра и горизонтальной трубки.



Рисунок 7.5 - Функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом пузырьковым методом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством, пузырьковой камеры и дифманометра.

Система автоматизированного контроля герметичности изделий газом манометрическим методом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и двух горизонтальных трубок (рисунок 7.6) содержит: дополнительную эталонную емкость 1, эталонную емкость 2; вентили 3, 27, 31, 17, 18, 21, 23, 26; герконовые выключатели 4 и 11; регулируемый упор 5; толкатель 6; цилиндрический редуктор 7, 14 и 34; электрический двигатель 8; диск 9; качающийся рычаг 10; упругие емкости 12 и 33; реверсивные электродвигатели 13 и 35; возвратно-поступательный шарнир 15 качающего рычага 10; червячный редуктор 16; первую и вторую горизонтальную трубку 19 и 28; емкостный измерительный преобразователь перемещения жидкостного поршня в

горизонтальной трубке 20 и 29; жидкостный поршень в горизонтальной трубке 22 и 30; вторичный показывающий прибор 24 и 37 перемещения жидкостного поршня в первой и во второй горизонтальных трубках; регулирующие блоки 25 и 38; изделие 32, испытываемое на герметичность; прибор 37, показывающий число оборотов электродвигателя, который подает газ в изделия для компенсации утечек.



Рисунок 7.6 - Функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом манометрическим методом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и двух горизонтальных трубок

Система автоматизированного контроля герметичности изделий газом манометрическим методом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и двух горизонтальных трубок состоит из следующих систем:

- системы автоматического управления амплитудой возмущений перемещения жидкостного поршня в первой горизонтальной трубке (и возмущений давления газа в эталонных емкостях) (элементы 19, 20, 22, 24, 25, 13, 14, 16, 15, 4 - 12, 1, 2);

- системы автоматического регулирования первоначального положения (восстановления первоначального положения) жидкостного поршня во второй горизонтальной трубке путем подачи в испытываемое изделие газа (равного объему утечек газа из изделия) (элементы 28,30,29, 37, 38, 35, 34, 33, 32, 2) и

- системы автоматического измерения объема газа, подаваемого в испытываемое изделие за время испытаний (элементы 33-36).

Система автоматизированная контроля герметичности изделий газом манометрическим методом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством, дифференциального манометра и горизонтальной трубки, приведенная на рисунке 7.7, содержит: дополнительную эталонную емкость 1, эталонную емкость 2; вентили 3, 26, 29, 17, 18, 19, 20, 24; герконовые выключатели 4 и 11; регулируемый упор 5; толкатель 6; цилиндрический редуктор 7, 14 и 32; электрический двигатель 8; диск 9; качающийся рычаг 10; упругие емкости 12 и 31; реверсивные электродвигатели 13 и 33; возвратнопоступательный шарнир 15 качающего рычага 10; червячный редуктор 16; дифференциальный манометр 21; вторичный показывающий прибор 22 амплитуды возмущений давления газа в эталонной и дополнительной емкостях; регулирующие блоки 23 и 36; изделие 25, испытываемое на герметичность; горизонтальную трубку 27 с жидкостным поршнем 28; емкостный измерительный преобразователь 30 перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке; прибор 34, показывающий число оборотов электродвигателя, который подает газ в изделия для компенсации утечек; показывающий прибор 35 перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке.

Система автоматизированная контроля герметичности изделий газом манометрическим методом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством, дифференциального манометра и горизонтальной трубки состоит из следующих систем:

- системы автоматического управления амплитудой возмущений давления газа в эталонных емкостях (элементы 21, 22, 23, 13, 14, 16, 15, 4 - 12, 1, 2);

- системы автоматического регулирования первоначального положения (восстановления первоначального положения) жидкостного поршня в горизонтальной трубке путем подачи в испытываемое изделие газа (равного объему утечек газа из изделия) (элементы 27, 28, 30, 35, 36, 33, 32, 31, 25, 2) и

- системы автоматического измерения объема газа, подаваемого в испытываемое изделие за время испытаний (элементы 31-34).



Рисунок 7.7 - Функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом манометрическим методом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством, дифференциального манометра и горизонтальной трубки

### 7.2.3 Система автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и дифманометров

Система автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и двух дифференциальных манометров (рисунок 7.8) содержит: дополнительную емкость 1, эталонную емкость 2; вентили 3, 17, 18, 19, 20, 24, 29, 31, 33; герконовые выключатели 4 и 11; регулируемый упор 5; толкатель 6; цилиндрический редуктор 7, 15 и 27; электрический двигатель 8; диск 9; качающийся рычаг 10; упругие емкости 12 и 26; реверсивные электродвигатели 13 и 28; возвратно-поступательный шарнир 14 качающего рычага 10; червячный редуктор 16; дифференциальный манометр 21; вторичный показывающий прибор 22 амплитуду возмущений давления газа в эталонной и дополнительной емкостях; регулирующие блоки 23 и 35; изделие 25, испытываемое на герметичность; прибор 30, показывающий число оборотов электродвигателя, который подает газ в изделие для компенсации утечек; показывающий прибор 32 разности давлений между эталонной емкостью и изделием.



Рисунок 7.8 - Функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и двух дифференциальных манометров

Система автоматизированного контроля герметичности изделий газом манометрическим методом с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и двух дифференциальных манометров состоит из следующих систем:

- системы автоматического управления амплитудой возмущений давления газа в эталонных емкостях (элементы 21, 22, 23, 12, 13, 14, 15, 16, 4 -11, 1, 2);

- системы автоматического регулирования нулевого перепада давлений между эталонной емкостью и изделием путем подачи в испытываемое изделие

газа, равного объему утечек газа из изделия (элементы 34, 32, 35, 28, 27, 26, 25, 2);

- системы автоматического измерения объема газа, подаваемого в испытываемое изделие за время испытаний (элементы 26-30).

### 7.2.4 Система автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством, дифманометров и пузырьковой камеры

На рисунке 7.9 приведена функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью с



Рисунок 7.9 - Функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и дифманометров использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и дифманометров, а на рисунке 7.10 - функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством, дифманометра и пузырьковой камеры.



Рисунок 7.10 - Функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством, дифманометра и пузырьковой камеры

Система автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и дифманометров (рисунок 7.9) содержит: дополнительную емкость 1; эталонную емкость 2; вентили 3, 17, 18, 19, 20, 24, 26, 28, 29, 31, 33, 35, 37; герконовые выключатели 4 и 11; регулируемый упор 5; толкатель 6; цилиндрический редуктор 7, 15 и 31; электрический двигатель 8; диск 9; качающийся рычаг 10; упругие емкости 12, 25 и 30; реверсивные электродвигатели 13 и 32; возвратно-поступательный шарнир 14 качающего рычага 10; червячный редуктор 16; дифференциальный манометр 21, 38; вторичный показывающий прибор 22 амплитуды возмущений давления газа в эталонной и дополнительной емкостях; регулирующие блоки 23 и 39; изделие 27, испытываемое на герметичность; прибор 34, показывающий число оборотов электродвигателя, который подает жидкость в изделия для компенсации утечек; показывающий прибор 36 разности давлений между эталонной емкостью и изделием.

Система автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством и двух дифманометров состоит из следующих систем:

- системы автоматического управления амплитудой возмущений давления жидкости в эталонных емкостях (элементы 21, 22, 23, 13, 15, 16, 14, 4 -12, 1, 2, 25);

- системы автоматического регулирования нулевого перепада давлений между эталонной емкостью и изделием путем подачи в испытываемое изделие жидкости (равного объему утечек жидкости из изделия) (элементы 38, 36, 39, 32, 31, 30, 27, 2, 25);

- системы автоматического измерения объема жидкости, подаваемой в изделие за время испытаний (элементы 30-34).

Система автоматизированного контроля герметичности изделий жилкостью с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством, дифманометра и пузырьковой камеры (рисунок 7.10) содержит: дополнительную емкость 1; эталонную емкость 2; вентили 3, 25, 29 - 33, 17, 18, 19, 20, 24; герконовые выключатели 4 и 11; регулируемый упор 5; толкатель с круглой головкой 6; цилиндрический редуктор 7 и 15; электрический двигатель 8; диск 9; качающийся рычаг 10; упругую емкость 12 и 26; реверсивный электрический двигатель 13; возвратно-поступательный шарнир 14 качающего рычага 10; червячный редуктор 16; дифференциальный манометр 21; показывающий прибор амплитуды возмущений давления 22; регулирующий блок 23; изделие 27, испытываемое на герметичность; камеру 28, заполненную газом, в которой расположена емкость 26. заполненная упругая жидкостью: барботажную трубку 34; пузырьковую камеру 35; счетчик пузырьков газа 36 и емкостный измерительный преобразователь 37 пузырьков газа, формируемых на нижнем срезе барботажной трубки.

Система автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью с использованием САУ с электрическим моторным исполнительным устройством, дифманометра и пузырьковой камеры состоит из следующих систем:

- системы автоматического управления амплитудой возмущений давления газа в эталонных емкостях (элементы 21, 22, 23, 13, 15, 16, 14, 4 - 12, 1, 2);

- системы автоматического измерения объема газа, проходящего через пузырьковую камеру 35 из эталонной емкости 2 в камеру 28 (элементы 27, 26, 28, 2, 35, 34, 36,37).

7.3 Системы автоматизированного контроля герметичности изделий с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством

7.3.1 Система автоматизированного контроля герметичности изделий

#### газом с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и горизонтальных трубок

На рисунке 7.11 приведена функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом манометрическим методом с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и горизонтальных трубок.

Эта система содержит: дополнительную эталонную емкость 1; эталонную емкость 2; электромагнитное сильфонное исполнительное устройство (сильфон 3, электромагнит 6, якорь электромагнита 4 и камера 5, в которой расположены элементы электромагнитного сильфонного устройства); вентили 7, 8, 10, 11, 13, 15, 16, 18, 20; изделие 9, испытываемое на герметичность; горизонтальные трубки 12 и 17 с жидкостными поршнями 14 и 19 и емкостными измерительными преобразователями 21 и 22 перемещения жидкостных поршней в горизонтальных трубках; усилители 23 и 26 электрических сигналов от емкостных измерительных преобразователей 21 и 22; усилитель постоянного тока 24, подаваемого на электромагнит 6; устройство связи с объектом 25 и управляющую ЭВМ 27.

Система автоматизированного контроля герметичности изделий газом манометрическим методом с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и горизонтальных трубок состоит из следующих систем:

- системы автоматического управления амплитудой возмущений давления пробного газа в эталонной емкости 2 и изделии 9 (амплитудой возмущений перемещения жидкостного поршня 14 в горизонтальной трубке 12) (элементы 1, 2, 11, 12, 13, 14, 15, 21, 23, 25, 27, 24, 6, 5, 4, 3);

- системы автоматического контроля герметичности изделия (элементы 9, 2, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 26, 25, 27) по утечкам, определяемым по разности положений жидкостного поршня 19 в горизонтальной трубке 17 до начала контроля герметичности и в конце контроля герметичности изделия.



Рисунок 7.11 - Функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и горизонтальных трубок

В системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и горизонтальных трубок входят устройства, подробно рассмотренные в работе [1]. Например, в устройство связи с объектом 25 входят: модули ограничения сигнала по максимуму, модули фильтрации и усиления аналоговых сигналов от измерительных преобразователей, модули коммутаторов, параллельный интерфейс и аналогоцифровой преобразователь для ввода сигналов от измерительных преобразователей; модуль таймеров для формирования временных интервалов, модуль контроллеров прерывания для формирования векторов прерывания и осуществления ввода информации или вывода управляющих сигналов на исполнительные механизмы, модуль цифроаналогового преобразования управляющих кодов от ЭВМ и формирования аналогового сигнала на электромагнитное сильфонное исполнительное устройство и другие модули и устройства.

Разработанная система, функциональная схема которой представлена на рисунке 7.11, позволяет проводить контроль герметичности изделий всех классов герметичности А, В, С и D газом в автоматизированном режиме с использованием ЭВМ. Контроль герметичности изделий классов А и В становится возможным с учетом того, что установлена и исследована (во втором разделе) возможность измерения с использованием горизонтальной трубки значений перепадов давлений на жидкостном поршне горизонтальной трубки, меньших, чем перепад давления, создаваемый поверхностным натяжением жидкостного поршня в горизонтальной трубке, при подводе периодических возмущений пробного газа в изделии или контрольного газа в эталонной емкости.

Работа системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом, представленной на рисунке 7.11, производится от управляющей ЭВМ 27 в следующей последовательности.

Закрывают вентили 10, 11, 15, 16 и 20, открывают вентили 8,7,18 и 13 и заполняют газом изделие 9, камеру 5, в которой расположено электромагнитное сильфонное исполнительное устройство, эталонную емкость 2 и дополнительную эталонную емкость 1. На функциональной схеме 6.15 не указаны электрические приводы вентилей, которые является стандартными.

Закрывают вентили 8,7, 18, 13 и открывают вентили 11, 15, 16, 20. Включается в работу САУ амплитудой возмущений давления контрольного газа в эталонной емкости 2, которая содержит элементы 12,14, 21, 23, 25, 27, 24, 6, 5, 4, 3, 2, 1. Включают в работу систему автоматического измерения утечек пробного газа из изделия 9, в которую входят устройства 17, 19, 22, 26, 25, 27. Измеряют с трехкратной повторностью максимальные или минимальные значения амплитуд отклонения жидкостного поршня 19 в горизонтальной трубке 17 при периодических возмущениях давления газа в эталонной емкости 2.

Испытывают изделие под заданным давлением в течение установленного времени, например, равного 60 или 90 с. Измеряют с трехкратной повторностью максимальные или минимальные значения амплитуд отклонения жидкостного поршня 19 в горизонтальной трубке 17 при периодических возмущениях давления газа в эталонной емкости 2.

Определяют разность максимальных или минимальных значений амплитуд отклонения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, полученных в конце и в начале испытаний изделия на герметичность. По полученной разности амплитуд делают заключение о герметичности изделия.

Объем утечек определяют по полученной разности амплитуд перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке умноженной на площадь поперечного сечения горизонтальной трубки. Закрывают вентили 11,15,16 и 20. Открывают вентиль 10 и выпускают газ из изделия 9. Отключают изделие от установки испытаний. Подключают новое изделие к установке испытаний.

На рисунке 7.12 приведена схема программы автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и горизонтальных трубок. На схеме программы автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием горизонтальных трубок (рисунок 7.12) операции по открытию или закрытию вентилей с электрическими приводами представлены совмещенными, например, «Закрыть вентили 10, 11, 15, 16 и 20». Фактически команды от программы управления обычно подаются последовательно на исполнительные механизмы и после каждой команды, например, «Закрыть вентиль 10» предусматривается операция проверки «Закрыт вентиль 10?» с возвратом назад по ходу программы, если не поступил сигнал обратной связи, сигнализирующий об исполнении поданной команды. На рисунке 7.12 для упрощения схемы не указаны операции по проверке исполнения команд.

Общие алгоритмы, например, ввода информации от измерительных преобразователей в ЭВМ используются широко распространенные, которые предусматривают проведение операций по проверке достоверности, фильтрации, линеаризации, проверке на технологические границы вводимых сигналов.

# 7.3.2 Система автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и горизонтальных трубок

На рисунке 7.13 приведена функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью манометрическим методом с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и горизонтальных трубок.



Рисунок 7.12 - Схема программы автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и горизонтальных трубок



Рисунок 7.13 - Функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и горизонтальных трубок

Система автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и горизонтальных трубок (рисунок 7.13) содержит те же функциональные элементы 1-25, которые являются составными частями системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и горизонтальных трубок (рисунок 7.13), а также упругую емкость 28, заполняемую жидкостью одновременно с изделием 9, и разделительную камеру 29, заполняемую контрольным газом.

Система автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью манометрическим методом с использованием горизонтальных трубок состоит фактически из тех же систем автоматического управления и контроля, что и система автоматизированного контроля герметичности изделий газом, рассмотренная выше.

### 7.3.3 Система автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и пузырьковой камеры

На рисунке 7.14 приведена функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и пузырьковой камеры.



Рисунок 7.14 - Функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и пузырьковой камеры

Система автоматизированного контроля герметичности изделий газом (рисунок 7.14) содержит: эталонную емкость 1; вентили 2, 8, 9, 10, 11, 13; электромагнитное сильфонное исполнительное устройство (сильфон 3, электромагнит 6, якорь электромагнита 4 и камера 5, в которой расположены элементы электромагнитного сильфонного устройства); изделие 7, испытываемое на герметичность; пузырьковую камеру 14 с барботажной трубкой 12 и емкостными измерительными преобразователями 20 перемещения жидкости в барботажной трубке и 21 формируемых пузырьков газа в жидкости пузырьковой камеры; усилитель постоянного тока 15, подаваемого на электромагнит 6; усилители 17 и 19 сигналов от емкостных измерительных преобразователей 20 и 21; устройство связи с объектом 16 и управляющую ЭВМ 18.

Система автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и пузырьковой камеры состоит из:

- системы автоматического управления амплитудой возмущений давления пробного газа в эталонной емкости 1 (и изделии 7) (амплитудой возмущений перемещения жидкости в барботажной трубке 12 пузырьковой камеры 14) (элементы 12, 14, 20, 17, 16, 18, 15, 6, 5, 4, 3, 1);

- системы автоматического контроля герметичности изделия 7 (элементы 14, 12, 21, 19, 18) по утечкам, определяемым по количеству пузырьков газа прошедших через жидкость пузырьковой камеры за время контроля герметичности изделия.

## 7.3.4 Система автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и пузырьковой камеры

На рисунке 7.15 приведена функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и пузырьковой камеры.

Система автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью содержит те же устройства 1–21, которые представлены на функциональной схеме на рисунке 7.14, а также разделительную камеру 24, упругую емкость 23 и вентили 22 и 25.

Система автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и пузырьковой камеры состоит из следующих систем:

- системы автоматического управления амплитудой возмущений давления пробного газа в эталонной емкости 1 (и жидкости в изделии 7) (амплитудой возмущений перемещения жидкости в барботажной трубке 12 пузырьковой камеры 14) (элементы 12, 14, 20,17,16,18, 15, 6, 5, 4, 3, 1);

- системы автоматического контроля герметичности изделия 7 (элементы 14, 12, 21, 19, 18, 24, 23, 7) по утечкам, определяемым по количеству пузырьков газа, прошедших через жидкость пузырьковой камеры за время контроля герметичности изделия.

Системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом или жидкостью с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и дифференциальных манометров имеют функциональные схемы, аналогичные схемам, представленным на рисунке 7.11 и 7.13, в которых взамен горизонтальных трубок подключены дифференциальные манометры.



Рисунок 7.15 - Функциональная схема системы автоматизированного контроля герметичности изделий жидкостью с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и пузырьковой камеры

Таким образом, разработаны функциональные схемы систем автоматизированного контроля герметичности изделий пробным газом или пробной жидкостью при периодических возмущениях давления пробной среды с использованием устройств с горизонтальной трубкой, пузырьковой камерой и дифференциальным манометром. Каждая из разработанных систем автоматизированного контроля герметичности изделий содержит систему автоматического управления амплитудой периодических возмущений давления пробной среды в устройствах контроля герметичности изделий и систему автоматического измерения объема утечек газа (жидкости) из изделия за установленное время контроля герметичности изделия.

### 8 Синтез систем автоматического управления амплитудой периодических возмущений давления пробной среды при контроле герметичности изделий

Необходимо отметить особенности синтеза систем автоматического управления амплитудой периодических возмущений давления пробной среды при контроле герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки или пузырьковой камеры.

В системах автоматического управления амплитудой периодических возмущений давления пробной среды, рассмотренных в разделе 7, используются устройства с горизонтальной трубкой или пузырьковой камерой, которые являются нелинейными динамическими звеньями. Анализ и синтез таких систем автоматического управления необходимо проводить с использованием методов теории нелинейных систем автоматического управления. Однако, анализ и синтез нелинейных систем проведен ниже с использованием методов теории линейных цифровых систем автоматического управления. Правомерность такого допущения объясняется следующими положениями. В настоящей работе предложен метод контроля герметичности при периодических возмущениях давления пробной среды. В третьем разделе теоретически доказывается, что при периодических возмущениях давления пробной среды происходит линеаризация нелинейной характеристики перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке от перепада давлений на этом поршне, вызываемого утечками среды из изделия.

Синтезируемые системы автоматического управления амплитудой периодических возмущений давления пробной среды при контроле герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки или пузырьковой камеры, рассмотренные ниже, являются программными системами управления, отрабатывающими единичные возмущения (возрастающие и уменьшающиеся поочередно), которые подаются от ЭВМ. Эти единичные возмущения давления пробной среды существенно большие по значению, чем пределы изменения перепада давления, приложенного к жидкостному поршню, в зоне нелинейности характеристики перемещения поршня в горизонтальной трубке от приложенного перепада давлений.

Таким образом, рассмотренная ниже методика и примеры анализа и синтеза нелинейных систем автоматического управления, разработана и применима, фактически, к специальным системам автоматического управления амплитудой периодических возмущений давления пробной среды, которые используются при автоматизированном контроле герметичности изделий.

#### 8.1 Синтез систем автоматического управления амплитудой периодических возмущений давления пробной среды при контроле герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки

8.1.1 Функциональная и структурная схемы САУ амплитудой перио-

#### дических возмущений давления пробного газа при контроле герметичности изделий устройствами с горизонтальной трубкой

Синтез систем автоматического управления амплитудой периодических возмущений давления пробной среды проведен на примере САУ амплитудой периодических возмущений давления пробного газа, которая входит в систему автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием САУ с электромагнитным сильфонным исполнительным устройством и горизонтальной трубки. Схема этой системы автоматизированного контроля герметичности изделий газом приведена на рисунке 7.11 и по ней составлена функциональная схема САУ амплитудой периодических возмущений давления пробного газа (рисунок 8.1).



ИП1 – измерительный преобразователь перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке в электрический сигнал; У1, У2 – усилители; Зд – задатчик; Т – квантователь; Р – дискретный регулятор; Ф - фиксатор; ИМ – исполнительный механизм; РО – регулирующий орган; ОУ – объект управления

Рисунок 8.1– Функциональная схема САУ амплитудой периодических возмущений давления пробного газа в устройствах автоматизированного контроля герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки

Функциональные элементы на рисунке 8.1 соответствуют следующим позициям из рисунка 7.11: ИП1 (измерительный преобразователь перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке в электрический сигнал) -21; У1, У2 (усилители) -23, 24; Зд (задатчик регулируемой величины) – входит в 27; Т (квантователь) – входит в 25; Р (цифровой регулятор) - 27; Ф (фиксатор) – входит в 25; ИМ (исполнительный механизм) - 6; РО (регулирующий орган) -3; ОУ (объект управления) -2, 12, 1.

Сигналы на функциональной схеме (рисунок 8.1) имеют следующее наименование:  $x_1$  –перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке, м;  $C_1$  – электрическая емкость на выходе измерительного преобразователя ИП1, Ф;  $U_1$  - напряжение на выходе усилителя У1, В;  $U_2$  - напряжение на выходе задатчика Зд, В;  $\Delta U$  - разность напряжений, поступающих от усилителя У1 и задатчика Зд, В;  $U_3^*$  -дискретный сигнал по напряжению на входе регулятора P, B;  $U_4^*$  - дискретный сигнал по напряжению на выходе регулятора P, B;  $U_4$  - напряжение на выходе фиксатора Ф, В;  $U_5$  - напряжение на выходе усилителя У2, В;  $S_1$  - перемещение якоря электромагнитного исполнительного механизма, м;  $P_1$  - давление на выходе регулирующего органа электромагнитного сильфонного исполнительного устройства, Па;  $P_0$  - статическое давление в объекте управления, подводимое в изделие при испытаниях на герметичность, Па;  $\Delta P_{0\text{max}} \sin wt$  - давление в объекте управления, создаваемое при периодических возмущениях, Па;  $P_2$  - общее давление, подводимое в объект управления, Па.

На рисунке 8.2 приведена функциональная схема управляемого процесса САУ, который объединяет часть элементов схемы, представленной на рисунке 8.1.



Рисунок 8.2 – Функциональная схема управляемого процесса САУ амплитудой периодических возмущений давления пробного газа в устройствах автоматизированного контроля герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки

В объект управления (ОУ), в соответствии со схемами, представленными на рисунке 8.1, 8.2 и 7.11, входят эталонная емкость 2, горизонтальная трубка 12 с жидкостным поршнем 14 и вспомогательная емкость 1. Объект управления, то есть, горизонтальная трубка с присоединенными эталонной емкостью и вспомогательной емкостью в динамике описывается дифференциальным уравнением (3.170), которое является нелинейным уравнением из-за действия поверхностного натяжения жидкости.

Нелинейная сила  $N_{\sigma}Sign[dx(t)/dt]$ , изменение которой в зависимости от скорости dx(t)/dt представлено на рисунке 3.32, может быть линеаризована, например, используя метод гармонической линеаризации нелинейных характеристик [75, 77,78, 91], в следующем виде

$$N_{\sigma}(x) = \frac{4c}{\pi A_{\pi} \omega_{\pi}} \frac{dx(t)}{dt},$$
(8.1)

где *с* – значение нелинейной силы, H, *c*=|  $N_{\sigma}$  |;

*А*<sub>л</sub> – амплитуда гармонических колебаний перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, м;

 $\omega_{\pi}$  – частота гармонических колебаний перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, с<sup>-1</sup>;

dx(t)/dt – скорость перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке, м/с.

С учетом (8.1) уравнение (3.170) принимает вид

$$m\frac{d^{2}x(t)}{dt^{2}} + \kappa_{e.mp}\frac{dx(t)}{dt} + \frac{E_{e}F_{mp}^{2}}{V_{u3}}x(t) + \frac{4c}{\pi A_{\pi}\omega_{\pi}}\frac{dx(t)}{dt} = \Delta P_{2}(t)F_{mp}.$$
 (8.2)

Преобразуем это уравнение по Лапласу и определим передаточную функцию

$$W_{x/\Delta P}(s) = \frac{x(s)}{\Delta P_{2}(s)F_{mp}} = \frac{V_{u3}}{E_{z}F_{mp}} \cdot \frac{1}{\frac{mV_{u3}}{E_{z}F_{mp}^{2}}s^{2} + \frac{k_{z,mp}V_{u3}}{E_{z}F_{mp}^{2}}s + 1 + \frac{4c}{\pi A_{\pi}\omega_{\pi}}\frac{V_{u3}}{E_{z}F_{mp}^{2}}s} = \frac{V_{u3}}{E_{z}F_{mp}}\left(\frac{1}{T_{2}^{2}s^{2} + 2\xi_{2\pi}T_{2}s + \frac{4c}{\pi A_{\pi}\omega_{\pi}}\frac{V_{u3}}{E_{z}F_{mp}^{2}}s + 1}\right) = \frac{V_{u3}}{E_{z}F_{mp}}\left(\frac{1}{T_{2}^{2}s^{2} + 2\xi_{2\pi}T_{2}s + 2\xi_{m}T_{2}s + 1}\right), \quad (8.3)$$

где  $T_2$  и  $\xi_2$  - постоянная времени и коэффициент демпфирования в соответствии с выражениями (3.175) и (3.176) имеют вид:

$$T_{2} = \frac{1}{F_{mp}} \sqrt{\frac{mV_{u3}}{E_{e}}}, \quad \xi_{2n} = \frac{k_{e.mp}}{2F_{mp}} \sqrt{\frac{V_{u3}}{mE_{e}}}, \quad (8.4)$$

 $\xi_{\mu}$  – коэффициент демпфирования линеаризованного слагаемого дифференциального уравнения (8.2), который выражен через основные величины уравнения (8.2) и постоянную времени  $T_2$ , определяется по выражению

$$\xi_{\mu} = \frac{2c}{\pi A_{\mu} \omega_{\mu} F_{mp}} \sqrt{\frac{V_{u3}}{mE_{c}}} \quad \text{ИЛИ} \quad \xi_{\mu} = \frac{4c}{\pi A_{\mu} \omega_{\mu} \kappa_{c,mp}} \xi_{2,\mu}.$$
(8.5)

Представим выражение (8.3) в виде структурной схемы (рисунок 8.3) с учетом статического нелинейного звена и динамического звена подобно тому, как выполнено в работе [75] для нелинейной характеристики «сухое трение».



Рисунок 8.3 – Структурная схема, составленная по выражению (8.3)
На основании теоретических положений, рассмотренных в разделах 3 и 6, на рисунке 8.4 представлена структурная схема управляемого процесса САУ амплитудой периодических возмущений давления пробного газа в устройствах автоматизированного контроля герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки (применительно к функциональной схеме, представленной на рисунке 8.2), с учетом гармонической линеаризации нелинейности при движении жидкостного поршня в горизонтальной трубке.

На рисунке 8.5 приведена общая структурная схема дискретной САУ амплитудой периодических возмущений давления пробного газа в устройствах автоматизированного контроля герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки (применительно к функциональной схеме, представленной на рисунке 8.1).

На рисунке 8.5 представлены:  $G_p(s)$  - передаточная функция дискретного регулятора, который ниже выбирается по логарифмическим частотным характеристикам управляемого процесса;  $G_{ho}(s)$  - передаточная функция экстраполятора нулевого порядка (фиксатора Ф на рисунке 8.1);  $G_{yn}(s)$  - передаточная функция управляемого процесса, функциональная схема которого приведена на рисунке 8.2;  $U_2(s)$  - управляющий сигнал от задатчика, B;  $U_3^*(s)$ ,  $U_4^*(s)$ - дискретные сигналы на входе и выходе дискретного регулятора, B;  $U_1(s)$  - выходной сигнал САУ амплитудой возмущений давления газа – напряжение на выходе усилителя напряжения, подключенного к выходу измерительного преобразователя ИП1 (рисунок 8.2), B;  $U_4(s)$  - аналоговый сигнал напряжения на выходе экстраполятора нулевого порядка, B.



Рисунок 8.4 – Структурная схема управляемого процесса САУ амплитудой периодических возмущений давления пробного газа с использованием горизонтальной трубки (применительно к функциональной схеме, представленной на рисунке 8.2) с учетом гармонической линеаризации нелинейности движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке

$$\underbrace{U_2(s)}_{\wedge} \xrightarrow{\Delta U(s)} \underbrace{U_3^*(s)}_{\wedge} G_p(s) \xrightarrow{U_4^*(s)}_{\vee} \xrightarrow{U_4(s)} \underbrace{U_4(s)}_{\vee} \xrightarrow{U_1(s)}_{\vee} \xrightarrow{U_1(s)}_{$$

Рисунок 8.5 – Структурная схема цифровой САУ амплитудой периодических возмущений давления пробного газа устройства автоматизированного контроля герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки

Проектируемая САУ амплитудой периодических возмущений давления пробного газа в устройствах автоматизированного контроля герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки может быть реализована различными способами в отношении восприятия и реализации задания.

Например, САУ может проектироваться таким образом, чтобы она работала в непрерывном колебательном режиме, исключая, в основном, остановки в изменении регулируемого параметра (давления газа в изделии или перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке). Такая САУ была первоначально разработана в работе.

Однако, она не типично реагирует на единичные возмущения. Поэтому разработан другой вариант работы САУ амплитудой периодических возмущений давления пробного газа как программной САУ.

В проектируемой программной САУ (рисунок 8.5) задание  $U_2(s)$  может изменяться по различной программе, задаваемой ЭВМ, например, кривыми 1, 2 или 3 (рисунок 8.6).



Рисунок 8.6 – Возможные варианты изменения во времени задания, подаваемого в САУ амплитудой возмущений давления газа в изделии

Учитывая, что проектируемая САУ является дискретной, для реализации кривой 1 на рисунке 8.6 необходимо формировать сигналы, изменяющиеся по линиям *абвгдежзиклмнор*.

Чтобы сделать какие-либо выводы о изменении регулируемого параметра на выходе проектируемой САУ амплитудой возмущений давления в зависимости от формы управляющих (программных) сигналов необходимо вначале рассмотреть переходные процессы в этой САУ при стандартных возмущениях.

#### 8.1.2 Передаточная функция управляемого процесса САУ амплитудой периодических возмущений давления пробного газа при контроле герметичности изделий устройствами с горизонтальной трубкой

Передаточная функция управляемого процесса  $G_{yn}(s)$ , согласно структурной схеме (рисунок 8.4) САУ амплитудой периодических возмущений давления пробного газа (применительно к функциональной схеме, представленной на рисунке 8.2), имеет вид

$$G_{yn}(s) = \frac{\kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 \kappa_4 \kappa_5 \kappa_6 T_E \cdot s}{\left(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1\right) \left[T_2^2 s^2 + 2(\xi_{2,n} + \xi_{\mu}) T_2 s + 1\right] (T_E s + 1)},$$
(8.6)

где  $T_1 = 0,2$  с,  $\xi_1 = 0,5$  и  $\kappa_4 = 0,01636$  мм/В – постоянная времени, коэффициент демпфирования и коэффициент преобразования для электромагнитного сильфонного исполнительного механизма;  $T_2 = 0,235$  с и  $\kappa_6 = V_{\mu_3}/E_2F_{mp}$ 0,0011 м/Па (для  $V_{u3} = 0,04$  м<sup>3</sup>,  $E_c = 0,127 \cdot 10^6$  Па и диаметра горизонтальной трубки, равного 6 мм) – постоянная времени и коэффициент преобразования для объекта управления, представляющего собой горизонтальную трубку с жидкостным поршнем и присоединенными к трубке эталонной и вспомогательной емкостями (для горизонтальной трубки как колебательного звена);  $\kappa_1 =$ 1,00 и  $T_{\rm E} = 0,008$  с – коэффициент усиления и постоянная времени емкостного измерительного преобразователя перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке устройства испытаний;  $\kappa_2 = 1000 - коэффициент усиления по$ напряжению емкостного измерительного преобразователя перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке; к<sub>3</sub> = 400 – коэффициент усиления по мощности электрического усилителя, установленного перед электромагнитом исполнительного механизма (определяется по мощности выбранного в разделе 6 электромагнита, равной 90 Вт, и входной мощности усилителя, равной 0,25 Вт;  $\kappa_5 = 0,0005$  мм/Па – коэффициент преобразования сильфонного регулирующего органа.

Заметим, что в САУ амплитудой возмущений давления газа по системе автоматизированного контроля герметичности изделий, представленной на рисунке 7.11, к горизонтальной трубке 12 подключены эталонная емкость 2 и вспомогательная емкость 1. К горизонтальной трубке 17 подключены изделие 9 и эталонная емкость 2. Таким образом, для САУ амплитудой возмущений давления в качестве изделия выступает эталонная емкость 2, а в качестве эталонной емкости - вспомогательная емкость 1. В выражении (8.6) не определены значения  $\xi_{2n}$  и  $\xi_{\mu}$ . Из выражения (8.4) следует, что, при одних и тех же конструктивных размерах горизонтальной трубки и жидкостного поршня в трубке и испытании изделий газом, коэффициент демпфирования  $\xi_{2n}$  изменяется в зависимости от объема изделия  $V_{u3}$ , контролируемого на герметичность.

Коэффициент демпфирования  $\xi_{\mu}$ , согласно выражению (8.5), изменяется как от объема изделия, так и от амплитуды  $A_{\pi}$  и частоты  $\omega_{\pi}$  гармонических колебаний перемещений жидкостного поршня в горизонтальной трубке, принимаемых при линеаризации движения жидкостного поршня в трубке.

Проведем оценку значений коэффициентов  $\xi_{2n}$  и  $\xi_{n}$  в зависимости от объема изделия и от амплитуды и частоты гармонических колебаний перемещений жидкостного поршня в горизонтальной трубке.

Принимаем: объем изделия  $V_{u_3} = 0,1 \text{ м} \cdot 0,1 \text{ м} = 0,001 \text{ м}^3$ ; диаметр горизонтальной трубки  $d_{mp} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; длина жидкостного поршня в горизонтальной трубке  $L_{nop} = 50 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; плотность воды жидкостного поршня  $\rho_{\mathcal{H}} = 998 \text{ кг/м}^3$ ; динамическая вязкость воды  $\mu = 1,05 \cdot 10^{-2} \text{ H} \cdot \text{с/m}^2$ ; модуль упругости газа (воздуха)  $E_c = 0,127 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ; c = 72,5 Па (для жидкостного поршня из воды);  $A_n = 900 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $\omega_n = 100 \text{ c}^{-1}$  (принимаем частоту  $\omega_n$ , равную 1/0,01, где 0,01 – период колебаний, с учетом того, что квантование непрерывного сигнала дискретной системой управления будет производиться с периодом, равным 0,1 с).

По этим данным определяем:  $\xi_{2n} = 0,221$  и  $\xi_{n1} = 0,043$ .

Если принять  $A_n = 450 \cdot 10^{-3}$  м;  $\omega_n = 25$  с<sup>-1</sup>, тогда  $\xi_{\mu 2} = 0,344$ .

Таким образом, сумма коэффициентов демпфирования составляет  $\xi_{2n} + \xi_{n} = 0,221 + (\text{от } 0,043 \text{ до } 0,344).$ 

Для изделия объемом  $V_{u_3} = 0,5 \text{ м} \cdot 0,5 \text{ м} \cdot 0,5 \text{ м} = 0,125 \text{ м}^3$  при тех же значения других параметров, которые приведены выше, получим:

 $\xi_{2\pi} = 2,466; \ \xi_{\mu 1} = 0,479 \text{ при } A_{\pi} = 900 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \ \omega_{\pi} = 100 \text{ c}^{-1} \text{ и}$ 

 $\xi_{\mu 2} = 3,832$  при  $A_{\mu} = 450 \cdot 10^{-3}$  м;  $\omega_{\mu} = 25$  c<sup>-1</sup>.

Таким образом, сумма коэффициентов демпфирования составляет  $\xi_{2n} + \xi_{n} = 2,466 + (\text{от } 0,479 \text{ до } 3,832).$ 

Известно, что чем меньше значение коэффициента демпфирования, тем больше колебательность в системе управления, поэтому принимаем для дальнейшего применения меньшие значения коэффициентов демпфирования  $\xi_{2n} + \xi_{n} = 0,221 + (0,043 + 0,344)/2 \approx 0,440.$ 

Передаточная функция управляемого процесса САУ амплитудой периодических возмущений давления пробного газа в устройстве испытаний с горизонтальной трубкой представлена в виде выражения (8.6) потому, что приняли начальные условия равными нулю для величин управляемого процесса  $G_{yn}(s)$  в соответствии со структурной схемой, приведенной на рисунке 8.4.

Фактически начальное условие для величины  $P_0$  – давления, при котором проводится контроль герметичности, не равно нулю. Однако, это давление остается практически неизменным в промежутках между возмущениями давления, когда САУ осуществляет регулирующие воздействия.

Управляемый процесс  $G_{yn}(z)$ , согласно рисунку 8.5, с экстраполятором нулевого порядка [92]

$$G_{ho}(s) = (1 - e^{-Ts})/s$$
 или  $G_{ho}(z) = 3[(1 - z^{-1})/s],$  (8.7)

принимает вид

$$G_{ho}G_{yn}(z) = (1 - z^{-1})3 \left[ \frac{\kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 \kappa_4 \kappa_5 \kappa_6 T_E \cdot s}{s \cdot (T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1) (T_2^2 s^2 + 2(\xi_{2\pi} + \xi_{\mu}) T_2 s + 1) (T_E s + 1)} \right] = 0$$

$$=\frac{\kappa_{1}\kappa_{2}\kappa_{3}\kappa_{4}\kappa_{5}\kappa_{6}T_{E}(z-1)}{z}3\left[\frac{1}{\left(T_{1}^{2}s^{2}+2\xi_{1}T_{1}s+1\right)\left[T_{2}^{2}s^{2}+2\left(\xi_{2\pi}+\xi_{\mu}\right)T_{2}s+1\right]\left(T_{E}s+1\right)}\right].$$
 (8.8)

Чтобы провести z – преобразование выражения (8.8) необходимо вначале частное в квадратных скобках разложить на алгебраическую сумму простых выражений, и для упрощения выражений принимаем, что  $\xi_{2\pi} + \xi_{\mu} = \xi_2$ .

$$\frac{1}{(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)(T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} = \frac{1}{2T_1 T_2 (A_1 T_3 - 1)(\xi_2 T_1 - \xi_1 T_2)} \cdot \left\{ \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{T_3} - \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{1 - \xi_1^2}{T_1^2}\right)\right]} \left[ \frac{1}{\left[\left(s + \frac{1}{T_3}\right)^2 - \left(\frac{s + \frac{\xi_1}{T_1}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2\right]} - \frac{\left(\frac{\xi_1}{T_1} - \frac{1}{T_3}\right)}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s + \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2} - \frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{\left(s$$

$$-\frac{1}{\left[\left(A_{1}-\frac{\xi_{1}}{T_{1}}\right)^{2}+\frac{\left(1-\xi_{1}^{2}\right)}{T_{1}^{2}}\right]} \cdot \left[\frac{1}{\left(s+A_{1}\right)}-\frac{\left(s+\frac{\xi_{1}}{T_{1}}\right)}{\left(s+\frac{\xi_{1}}{T_{1}}\right)^{2}+\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{1}^{2}}}{T_{1}}\right)^{2}} -\frac{\left(\frac{\xi_{1}}{T_{1}}-A_{1}\right)}{\left(s+\frac{\xi_{1}}{T_{1}}\right)^{2}+\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{1}^{2}}}{T_{1}}\right)^{2}} \cdot \frac{\frac{\sqrt{1-\xi_{1}^{2}}}{T_{1}}}{\frac{\sqrt{1-\xi_{1}^{2}}}{T_{1}}}\right] -$$

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{\left[\left(\frac{1}{T_3}-\frac{\xi_2}{T_2}\right)^2+\frac{\left(1-\xi_2^2\right)}{T_2^2}\right]}\cdot \left[\frac{1}{\left(s+\frac{1}{T_3}\right)}-\frac{\left(s+\frac{\xi_2}{T_2}\right)}{\left(s+\frac{\xi_2}{T_2}\right)^2+\left(\frac{\sqrt{1-\xi_2^2}}{T_2}\right)^2}-\right.\\ & \left.\frac{\left(\frac{\xi_2}{T_2}-\frac{1}{T_3}\right)}{\left(s+\frac{\xi_2}{T_2}\right)^2+\left(\frac{\sqrt{1-\xi_2^2}}{T_2}\right)^2}\cdot \frac{\sqrt{1-\xi_2^2}}{T_2}\right]+ \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{\left[\left(A_{1} - \frac{\xi_{2}}{T_{2}}\right)^{2} + \frac{\left(1 - \xi_{2}^{2}\right)}{T_{2}^{2}}\right]} \cdot \left[\frac{1}{\left(s + A_{1}\right)} - \frac{\left(s + \frac{\xi_{2}}{T_{2}}\right)}{\left(s + \frac{\xi_{2}}{T_{2}}\right)^{2} + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_{2}^{2}}}{T_{2}}\right)^{2}} - \frac{\left(\frac{\xi_{2}}{T_{2}} - A_{1}\right)}{\left(s + \frac{\xi_{2}}{T_{2}}\right)^{2} + \left(\frac{\sqrt{1 - \xi_{2}^{2}}}{T_{2}}\right)^{2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - \xi_{2}^{2}}}{T_{2}}}{\frac{\sqrt{1 - \xi_{2}^{2}}}{T_{2}}}\right] \right\},$$

где

$$A_{1} = \frac{\left(\frac{\xi_{2}^{2}}{T_{2}^{2}} - \frac{\xi_{1}^{2}}{T_{1}^{2}}\right) + \left(\frac{1 - \xi_{2}^{2}}{T_{2}^{2}} - \frac{1 - \xi_{1}^{2}}{T_{1}^{2}}\right)}{\left(\frac{2\xi_{2}}{T_{2}} - \frac{2\xi_{1}}{T_{1}}\right)}.$$

Делаем подстановку этих выражений в передаточную функцию управляемого процесса (8.8) и переходим от *s* – преобразования к *z* - преобразованию

$$G_{ho}G_{yn}(z) = \frac{\kappa_{1}T_{E}\kappa_{2}\kappa_{3}\kappa_{4}\kappa_{5}\kappa_{6}}{2T_{1}T_{2}(A_{1}T_{E}-1)(\xi_{2}T_{1}-\xi_{1}T_{2})} \cdot \frac{(z-1)}{z}$$

$$\begin{cases} \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{T_E} - \frac{\xi_1}{T_1}\right)^2 + \frac{\left(1 - \xi_1^2\right)}{T_1^2}\right]} \left[\frac{z}{\left(z - e^{-\frac{1}{T_E}T}\right)} - \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \left(e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T}\right)^2} - \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T}}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \left(e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T}\right)^2} - \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T}}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \left(e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T}\right)^2} - \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \left(e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T}\right)^2} - \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \left(e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T}\right)^2} - \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \left(e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T}\right)^2} - \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \left(e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T}\right)^2} - \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \left(e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T}\right)^2} - \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \left(e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T}\right)^2} - \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_1^2}}{T_1}\right)T + \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_1}{T_1}T} \cdot \cos\left(\frac{\xi_1^2 - \xi_1^2}{T_1$$

$$-\frac{\left(\frac{\xi_{1}}{T_{1}}-\frac{1}{T_{E}}\right)}{\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{1}^{2}}}{T_{1}}\right)} \cdot \frac{z \cdot e^{-\frac{\xi_{1}}{T_{1}}T} \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{1}^{2}}}{T_{1}}\right)T}{z^{2}-2z \cdot e^{-\frac{\xi_{1}}{T_{1}}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{1}^{2}}}{T_{1}}\right)T + \left(e^{-\frac{\xi_{1}}{T_{1}}T}\right)^{2}}\right] - \frac{1}{\left[\left(A_{1}-\frac{\xi_{1}}{T_{1}}\right)^{2} + \frac{\left(1-\xi_{1}^{2}\right)}{T_{1}^{2}}\right]}$$

$$\cdot \left[\frac{z}{\left(z-e^{-A_{1}T}\right)} - \frac{z^{2}-z \cdot e^{-\frac{\xi_{1}}{T_{1}}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{1}^{2}}}{T_{1}}\right)T}{z^{2}-2z \cdot e^{-\frac{\xi_{1}}{T_{1}}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{1}^{2}}}{T_{1}}\right)T + \left(e^{-\frac{\xi_{1}}{T_{1}}T}\right)^{2}} - \frac{\left(\frac{\xi_{1}}{T_{1}} - A_{1}\right)}{\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{1}^{2}}}{T_{1}}\right)}$$

$$z \cdot e^{-\frac{\xi_{1}}{T_{1}}T} \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{1}^{2}}}{T_{1}}\right)T$$
$$\cdot \frac{1}{z^{2} - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_{1}}{T_{1}}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{1}^{2}}}{T_{1}}\right)T + \left(e^{-\frac{\xi_{1}}{T_{1}}T}\right)^{2}}{\left[\left(\frac{1}{T_{E}} - \frac{\xi_{2}}{T_{2}}\right)^{2} + \frac{\left(1-\xi_{2}^{2}\right)}{T_{2}^{2}}\right]} \cdot$$

$$\cdot \left[ \frac{z}{\left(z - e^{-\frac{1}{T_E}T}\right)} - \frac{z^2 - z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_2^2}}{T_2}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_2^2}}{T_2}\right) T + \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right)^2} - \frac{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_2^2}}{T_2}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_2^2}}{T_2}\right) T} + \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_2^2}}{T_2}\right) T} + \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_2^2}}{T_2}\right) T} + \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_2^2}}{T_2}\right) T} + \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_2^2}}{T_2}\right) T} + \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_2}}{T_2}\right) T} + \frac{1}{2} \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T} + \frac{1}{2} \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T} + \frac{1}{2} \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T} + \frac{1}{2} \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T} + \frac{1}{2} \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T} + \frac{1}{2} \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T} + \frac{1}{2} \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T} + \frac{1}{2} \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T} + \frac{1}{2} \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right) T} + \frac{1}{2} \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T} + \frac{1}{2} \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right) T} + \frac{1}{2} \left(e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T}\right) T}{z^2 - 2z \cdot e^{-\frac{\xi_2}{T_2}T} \cdot \cos\left(\frac{1 - \xi_2}{T_2}\right) T} + \frac{1}{2} \left($$

$$-\frac{\left(\frac{\xi_{2}}{T_{2}}-\frac{1}{T_{E}}\right)}{\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{2}^{2}}}{T_{2}}\right)} \cdot \frac{z \cdot e^{-\frac{\xi_{2}}{T_{2}}T} \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{2}^{2}}}{T_{2}}\right)T}{\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{2}^{2}}}{T_{2}}\right)} + \frac{1}{z^{2}-2z \cdot e^{-\frac{\xi_{2}}{T_{2}}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{2}^{2}}}{T_{2}}\right)T + \left(e^{-\frac{\xi_{2}}{T_{2}}T}\right)^{2}}\right] + \frac{1}{\left[\left(A_{1}-\frac{\xi_{2}}{T_{2}}\right)^{2} + \frac{\left(1-\xi_{2}^{2}\right)}{T_{2}^{2}}\right]}$$

$$\cdot \left[\frac{z}{\left(z-e^{-A_{1}T}\right)} - \frac{z^{2}-z \cdot e^{-\frac{\xi_{2}}{T_{2}}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{2}^{2}}}{T_{2}}\right)T}{z^{2}-2z \cdot e^{-\frac{\xi_{2}}{T_{2}}T} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{2}^{2}}}{T_{2}}\right)T + \left(e^{-\frac{\xi_{2}}{T_{2}}T}\right)^{2}} - \frac{1}{2}\right]$$

$$-\frac{\left(\frac{\xi_{2}}{T_{2}}-A_{1}\right)}{\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{2}^{2}}}{T_{2}}\right)}\cdot\frac{z\cdot e^{-\frac{\xi_{2}}{T_{2}}T}}{z^{2}-2z\cdot e^{-\frac{\xi_{2}}{T_{2}}T}}\cdot\cos\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{2}^{2}}}{T_{2}}\right)T+\left(e^{-\frac{\xi_{2}}{T_{2}}T}\right)^{2}\right]\right\}$$

После вычисления и подстановки значений всех коэффициентов в этом выражении, получим

$$G_{ho}G_{yn}(z) = \frac{0,091(z-1)}{z} \cdot \left[ \frac{0,0657(z^2 - 0,154^T z \cos 3,821T) + 0,0154 \cdot 0,154^T \sin 3,821T}{z^2 - 2 \cdot 0,154^T z \cos 3,821T + 0,0237^T} - \frac{0,0175}{z^2 - 2 \cdot 0,154^T z \cos 3,821T + 0,0237^T} - \frac{0,0482(z^2 - 0,082^T z \cos 4,33T) + 0,0175 \cdot 0,082^T \sin 4,33T}{z^2 - 2 \cdot 0,082^T z \cos 4,33T + 0,0067^T} \right]. (8.9)$$

# 8.1.3 Построение частотных характеристик управляемого процесса и выбор передаточной функции регулятора САУ амплитудой периодических возмущений давления газа при контроле герметичности изделий устройствами с горизонтальной трубкой

Проектируемая САУ амплитудой периодических возмущений давления газа при контроле герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки характеризуется тем, что управляемый параметр (давление газа) при возмущениях изменяется за небольшие промежутки времени. Например, постоянная времени в одном из примеров горизонтальной трубки с устройствами контроля герметичности изделий составляет 0,235 с. В работе [1] предлагается для подобных объектов управления выбирать промежутки времени между вводом информации от измерительных преобразователей не более 0,2 с. Принимаем время квантования сигналов в проектируемой цифровой САУ T = 0,1 с.

Если T = 0,1 с, тогда (8.9) принимает вид

$$G_{ho}G_{yn}(z) = 0,091(z-1) \left[ \frac{0,0657\,z - 0,0459}{z^2 - 1,54z + 0,687} - \frac{0,0175}{z - 0,896} - \frac{0,0482\,z - 0,0284}{z^2 - 1,415\,z + 0,606} \right].(8.10)$$

Для построения частотных характеристик на *W*-плоскости принимают [92]

$$z = (1 + i\omega_w) / (1 - i\omega_w).$$
(8.11)

После подстановки (8.11) в (8.10) получим

$$G_{ho}G_{yn}(i\omega_w) = 9.1 \cdot 10^{-5} \cdot \left[ \frac{(0.3 - 8.8\omega_w^2 - 78.8\omega_w^4) + i(6.9\omega_w - 8.6\omega_w^3 + 54.\omega_w^5)}{(0.003 - 0.606\omega_w^2 + 9.42\omega_w^4) + i(0.085\omega_w - 3.402\omega_w^3 + 18.431\omega_w^5)} \right].$$
(8.12)

Для исключения мнимого числа в знаменателе домножаем знаменатель и числитель выражения (8.12) на сопряженный знаменатель. После этих преобразований получим

$$+i \cdot \frac{\left(-0,0048\omega_{w} - 2,438\omega_{w}^{3} + 41,625\omega_{w}^{5} - 219,788\omega_{w}^{7} + 1963,087\omega_{w}^{98}\right)}{\left(0,003 - 0,606\omega_{w}^{2} + 9,42\omega_{w}^{4}\right)^{2} + \left(0,085\omega_{w} - 3,402\omega_{w}^{3} + 18,431\omega_{w}^{5}\right)^{2}}\right].$$
(8.13)

Вещественная и мнимая частотные функции управляемого процесса рассматриваемой САУ в соответствии с (8.13) имеют вид:

$$U_{yn}(\omega_w) = 9.1 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\left(0.0009 + 0.378\omega_w^2 - 99.203\omega_w^4 + 208.791\omega_w^6 - 1085.43\omega_w^8\right)}{\left(0.003 - 0.606\omega_w^2 + 9.42\omega_w^4\right)^2 + \left(0.085\omega_w - 3.402\omega_w^3 + 18.431\omega_w^5\right)^2}, (8.14)$$

$$V_{yn}(\omega_w) = 9.1 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\left(-0.0048\omega_w - 2.438\omega_w^3 + 41.625\omega_w^5 - 219.788\omega_w^7 + 1963.087\omega_w^9\right)}{\left(0.003 - 0.606\omega_w^2 + 9.42\omega_w^4\right)^2 + \left(0.085\omega_w - 3.402\omega_w^3 + 18.431\omega_w^5\right)^2}.(8.15)$$

Определяем амплитудную и фазовую частотные характеристики управляемого процесса по выражениям [75, 91, 92], принимая амплитуду перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке в мм, то есть, после умножения коэффициента  $9,1\cdot10^{-5}$  на  $10^{+3}$ 

$$A_{yn}(\omega_w) = \sqrt{U_{yn}^2(\omega_w) + V_{yn}^2(\omega_w)}, \qquad (8.16)$$

$$\varphi_{yn}(\omega_w) = arktg \frac{V_{yn}(\omega_w)}{U_{yn}(\omega_w)}.$$
(8.17)

$$A_{yn}(\omega_w) = \frac{0,091}{\left[\left(0,003 - 0,606\omega_w^2 + 9,42\omega_w^4\right)^2 + \left(0,085\omega_w - 3,402\omega_w^3 + 18,431\omega_w^5\right)^2\right]} \cdot \left[\left(0,0009 + 0,378\omega_w^2 - 99,203\omega_w^4 + 208,791\omega_w^6 - 1085,43\omega_w^8\right)^2 + \left(-0,0048\omega_w - 2,438\omega_w^3 + 41,625\omega_w^5 - 219,788\omega_w^7 + 1963,087\omega_w^9\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}.$$
 (8.18)

Если взять десятичный логарифм от выражения (8.18) и умножить обе его части на 20, тогда получим

$$20 \lg A_{yn}(\omega_w) = 20 \lg 0,09 \amalg 20 \lg \left[ \left( 0,0009 + 0,378\omega_w^2 - 99,203\omega_w^4 + 208,791\omega_w^6 - 1085,43\omega_w^8 \right)^2 + \left( -0,0048\omega_w - 2,438\omega_w^3 + 41,625\omega_w^5 - 219,788\omega_w^7 + 1963,087\omega_w^9 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 20 \lg \left[ \left( 0,003 - 0,606\omega_w^2 + 9,42\omega_w^4 \right)^2 + \left( 0,085\omega_w - 3,402\omega_w^3 + 18,431\omega_w^5 \right)^2 \right]. (8.19)$$

Так как lgN = 0,434lnN и, принимая обозначение  $20 \lg A_{yn}(\omega_w) = L_{yn}(\omega_w)$ , выражение (8.19) принимает вид

$$+ \left(-0,0048\omega_w - 2,438\omega_w^3 + 41,625\omega_w^5 - 219,788\omega_w^7 + 1963,087\omega_w^9\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} -$$

$$-\ln\left[\left(0,003-0,606\omega_{w}^{2}+9,42\omega_{w}^{4}\right)^{2}+\left(0,085\omega_{w}-3,402\omega_{w}^{3}+18,431\omega_{w}^{5}\right)^{2}\right]\right\}.$$
 (8.20)

Результаты вычислений по выражению (8.20) приведены в таблице 8.1 и на рисунке 8.7 (кривая 1). Таблица 8.1

| $\omega_w, c^{-1}$                    | 0,00 | 0,001 | 0,1  | 0,2  | 0,5 | 1,0  | 10,0  |
|---------------------------------------|------|-------|------|------|-----|------|-------|
| $L_{yn}(\omega), \partial \mathbf{b}$ | 19,2 | 22,4  | 23,9 | 46,5 | 9,7 | -4,4 | -31,4 |

Фазочастотная характеристика управляемого процесса в соответствии с (8.14) и (8.15) определяется выражением

$$\varphi_{yn}(\omega_w) = arktg \frac{\left(-0.0048\omega_w - 2.438\omega_w^3 + 41.625\omega_w^5 - 219.788\omega_w^7 + 1963.087\omega_w^9\right)}{\left(0.0009 + 0.378\omega_w^2 - 99.203\omega_w^4 + 208.791\omega_w^6 - 1085.43\omega_w^8\right)}.$$
 (8.21)

Результаты вычислений по выражению (8.21) приведены в таблице 8.2 и на рисунке 8.7 (кривая 2).



Рисунок 8.7 – Логарифмические амплитудная (кривая 1) и фазовая (кривая 2) частотные характеристики управляемого процесса САУ амплитудой периодических возмущений давления газа при контроле герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки

| Таблица 8 | 3.2 |
|-----------|-----|
|-----------|-----|

| $\omega_w, c^{-1}$            | 0,001  | 0,1    | 0,2    | 0,5    | 1,0    | 10,0   |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $arphi_{yn}(\omega_w),$ град. | -179,9 | -149,0 | -184,0 | -203,0 | -242,0 | -267,0 |

Выбор регулятора САУ амплитудой периодических возмущений давления газа при контроле герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки проведем по логарифмическим (рисунок 8.7) амплитудной (кривая 1) и фазовой (кривая 2) частотным характеристикам управляемого процесса по [92].

Логарифмические амплитудная и фазовая частотные характеристики для САУ амплитудой периодических возмущений давления газа построены при периоде квантования сигнала цифровой системой управления T = 0,1 с. Как видно из логарифмической амплитудной частотной характеристики (рисунок 8.7 кривая 1) на частотах близких к 0,2 с<sup>-1</sup> в управляемом процессе проектируемой САУ возникают автоколебания, при которых амплитуда резко возрастает. Для САУ, которая должна поддерживать амплитуду возмущений на заданном значение вхождение системы в автоколебательный режим не желательно. Необходимо, чтобы регулятор САУ поддерживал заданное значение амплитуды.

По кривым 1 и 2 (рисунок 8.7) определяем частоту среза  $\omega_{cp1} = 0.9 \text{ c}^{-1}$  и угол  $\phi_{3an1} = -42^{\circ}$ , характеризующий запас устойчивости системы по фазе. Рекомендуется запас устойчивости по фазе [78] иметь +(30 - 40°). Чтобы иметь такой запас устойчивости по фазе для рассматриваемой системы необходимо по логарифмической фазовой частотной характеристике (рисунок 8.7 кривая 2) сместиться влево до частоты  $\omega = 0,1$ . При выборе регулятора необходимо эту частоту еще уменьшать в несколько раз [92]. Уменьшаем эту частоту до  $\omega_{\rm H} = 0,055$  (принимаем максимальное значение по кривой 2).

Учитывая вид логарифмических частотных характеристик, особенно резкое снижение фазы после частоты  $\omega = 0,18$ , для создания необходимого запаса устойчивости по фазе рекомендуется [92] выбирать регулятор, «дающий либо опережение по фазе (фильтр верхних частот), либо отставание по фазе (фильтр нижних частот)». Регулятор с опережением по фазе в данном случае может оказаться неэффективным.

Заметим, что регулятор с передаточной функцией, например,  $G(z) = K_p \frac{z - 0.795}{z - 0.890}$  имеет полюс при значении z = +0.890 и корень при значении z = +0.795, причем значения полюса и корня лежат на положительной полуоси на z - плоскости и кроме этого значение полюса расположено правее корня на z - плоскости.

Такое расположение полюсов и корней регулятора на *z* - плоскости обеспечивает в системе управления переходный процесс приближающийся к апериодическому. Регуляторы с подобным расположением полюсов и нулей на *z* - плоскости (не учитывая других вариантов расположения полюсов и корней на *z* - плоскости) относятся [92] к регуляторам с отставанием по фазе (к фильтрам нижних частот).

Регулятор с передаточной функцией, например,  $G(z) = K_p \frac{z + 0.795}{z + 0.890}$  имеет

полюс при значении z = -0,890 и корень при значении z = -0,795, причем значения полюса и корня лежат на отрицательной полуоси на *z*-плоскости и кроме этого значение полюса расположено левее корня на *z*-плоскости. Регуляторы с подобным расположением полюсов и нулей на *z*-плоскости (не учитывая других вариантов расположения полюсов и корней на *z*-плоскости) относятся [92] к регуляторам с опережением по фазе (к фильтрам верхних частот).

Учитывая, что имеется соотношение [92] между переменными z и w соответственно на Z и W- плоскости  $z = \frac{1+w}{1-w}$ , для регулятора с отставанием по фазе с передаточной

$$G(z) = K_p \frac{z - 0.795}{z - 0.890}$$

на *W*-плоскости получим передаточную функцию  $G(w) = 1,864 \cdot K_p \frac{1+8,756w}{1+17,182w}$ , а для регулятора с опережением по фазе с передаточной  $G(z) = K_p \frac{z+0,795}{z+0,890}$  на *W*-плоскости получим передаточную функцию  $G(w) = 0,950 \cdot K_p \frac{1+0,114w}{1+0,058w}$ .

Из этого анализа следует, что более рациональным для проектируемой САУ амплитудой возмущений давления пробной среды при контроле герметичности изделий может оказаться регулятор с отставанием по фазе.

Типовой регулятор с отставанием по фазе имеет в общем виде передаточную функцию [92]

$$G_p(s) = \frac{1 + ars}{1 + rs}$$

или при выборе регулятора по логарифмическим частотным характеристикам, построенным на *W* плоскости, передаточная функция регулятора с отставанием по фазе

$$G_p(w) = \frac{1 + arw}{1 + rw},$$
(8.22)

где *s* - оператор Лапласа,  $c^{-1}$ ;

w - оператор W – преобразования, с<sup>-1</sup>;

а – коэффициент преобразования (усиления);

*r* – коэффициент преобразования, с.

Коэффициент преобразования *а* характеризует значение амплитуды по кривой 2 (рисунок 8.7) при фазе, равной  $-180^{\circ}$ . То есть,  $L_{yn}(\omega_w) = -46,5 \ \partial E$  (с противоположным знаком берется потому, что эту амплитуду необходимо компенсировать). В этом случае [92]

$$20 \lg a = -L_{vn}(\omega_w)$$

или 20lg a = -46,5; lga = -2,325;  $a = 10^{-2,235} = 0,00472$ .

Коэффициенты преобразования *а* и г взаимосвязаны с новой выбранной частотой  $\omega_{\rm H}$  выражением [92]

$$1/ar = \omega_{\rm H}$$

или 1/(0,00472*r*) = 0,055; *r* = 3853,9; *ar* = 18,23.

С учетом полученных значений величин передаточная функция регулятора

$$G_p(w) = \frac{1+18,23w}{1+3853,9w}.$$
(8.23)

Чтобы видоизменить передаточную функцию регулятора к z - преобразованию необходимо выполнить замену переменных по выражению [92] w = (z-1)/(z+1)

$$G_p(z) = \frac{0,00499(z-0,896)}{(z-0,9995)} = \frac{K_p(z-0,896)}{(z-1)}.$$
(8.24)

#### 8.1.4 Переходные характеристики САУ амплитудой периодических возмущений давления газа с выбранным регулятором при контроле герметичности изделий устройствами с горизонтальной трубкой

Передаточная функция разомкнутой САУ амплитудой периодических возмущений давления пробного газа с выбранным регулятором при контроле герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки в соответствии с выражениями (8.10) и (8.24) принимает вид

$$G_{p}(z)G_{ho}G_{yn}(z) = \frac{0.091K_{p}(z-0.896)(z-1)}{(z-1)} \cdot \left[\frac{0.0657\ z-0.0459}{z^{2}-1.54\ z+0.687} - \frac{0.0175}{z-0.896} - \frac{0.0482\ z-0.0284}{z^{2}-1.415\ z+0.606}\right] = \frac{0.091 \cdot K_{p}(0.591z^{4}-0.837z^{3}+0.394z^{2}-0.0375z)}{z^{4}-2.955z^{3}+3.472z^{2}-1.905z+0.416}.$$
(8.25)

Как видно из этого выражения, выбранный регулятор компенсирует один из полюсов управляемого процесса 1/(*z* - 0,896), что должно способствовать формированию затухающего переходного процесса в системе управления при поступления в нее возмущений.

Корни квадратного трехчлена  $z^2 - 1,54z + 0,687 = 0$ ,  $z_{1,2} = 0,77 \pm 0,307i$ , а трехчлена  $z^2 - 1,415z + 0,606 = 0$ ,  $z_{1,2} = 0,707 \pm 0,315i$  расположены внутри

единичного круга на *z* - плоскости и свидетельствуют об устойчивости рассматриваемой САУ в разомкнутом состоянии.

При  $K_p = 20,0$  выражение (8.25) после упрощения принимает вид

$$G_p(z)G_{ho}G_{yn}(z) = \frac{1,078z^4 - 1,524z^3 + 0,718z^2 - 0,068z}{z^4 - 2,955z^3 + 3,472z^2 - 1,905z + 0,416}.$$
(8.26)

Для замкнутой САУ передаточная функция

$$G_{3am}(z) = \frac{U_1(z)}{U_2(z)} = \frac{G_p(z)G_{ho}G_{yn}(z)}{1 + G_p(z)G_{ho}G_{yn}(z)}$$
(8.27)

или после подстановки в это выражения передаточной функции разомкнутой САУ получим

$$G_{3am}(z) = \frac{U_1(z)}{U_2(z)} = \frac{1,078z^4 - 1,524z^3 + 0,718z^2 - 0,068z}{2,078z^4 - 4,479z^3 + 4,190z^2 - 1,973z + 0,416}$$

Если подать единичное возмущение  $U_2(z) = z/(z-1)$ , тогда

$$U_1(z) = \frac{1,078z^5 - 1,524z^4 + 0,718z^3 - 0,068z^2}{2,078z^5 - 6,551z^4 + 8,669z^3 - 6,160z^2 + 2,389z - 0,416}.$$

Результаты вычислений по этому выражению приведены в таблице 8.3 и на рисунке 8.8 (кривая 1).

| Табли         | ца 8.3 |      |      |      |      |      |      |
|---------------|--------|------|------|------|------|------|------|
| <i>t</i> , c  | 0,1    | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  |
| $U_1(t)$ , мВ | 0,52   | 0,90 | 1,05 | 0,97 | 0,87 | 0,79 | 0,74 |

Продолжение таблицы 8.3

| <i>t</i> , c  | 0,8  | 0,9  | 1,0  | 1,1  | 1,2  | 1,3  | 1,4  |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $U_1(t)$ , мВ | 0,71 | 0,69 | 0,66 | 0,63 | 0,60 | 0,57 | 0,55 |

Установившееся значение регулируемого параметра [92] для системы с выбранным дискретным регулятором при  $K_p = 20,0$ , учитывая, что  $U_1(z) = G_{3aM}(z) \cdot U_2(z) = G_{3aM}(z) \cdot z/(z-1)$ ,

$$\lim_{z \to 1} (1 - z^{-1}) U_1(z) = \lim_{z \to 1} \frac{z - 1}{z} \cdot \frac{1,078z^4 - 1,524z^3 + 0,718z^2 - 0,068z}{2,078z^4 - 4,479z^3 + 4,190z^2 - 1,973z + 0,416} \cdot \frac{z}{z - 1} = 0$$

= 0,204/0,232 = 0,879 и статическая ошибка равна 0,121.

При К<sub>p</sub> = 85,0 выражение (8.25) после упрощения принимает вид

$$G_p(z)G_{ho}G_{yn}(z) = \frac{4,549z^4 - 6,431z^3 + 3,030z^2 - 0,287z}{z^4 - 2,955z^3 + 3,472z^2 - 1,905z + 0,416},$$

а передаточная функция замкнутой системы управления

$$G_{3am}(z) = \frac{U_1(z)}{U_2(z)} = \frac{4,549z^4 - 6,431z^3 + 3,030z^2 - 0,287z}{5,549z^4 - 9,386z^3 + 6,502z^2 - 2,192z + 0,416}$$

Если подать единичное возмущение  $U_2(z) = z/(z-1)$ , тогда

$$U_1(z) = \frac{0,455z^5 - 0,643z^4 + 0,303z^3 - 0,0287z^2}{0,555z^5 - 1,494z^4 + 1,589z^3 - 0,869z^2 + 0,281z - 0,0416} .$$
 (8.28)

Результаты вычислений по этому выражению приведены в таблице 8.4 и на рисунке 8.8 (кривая 2).

| Табли                                 | ца 8.4 |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|--------|------|------|------|------|------|------|
| <i>t</i> , c                          | 0,1    | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  |
| <i>U</i> <sub>1</sub> <i>(t)</i> , мВ | 0,82   | 1,05 | 1,02 | 0,98 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |

Продолжение таблицы 8.4

| <i>t</i> , c                           | 0,8  | 0,9  | 1,0  | 1,1  | 1,2  | 1,3  | 1,4  |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>U</i> <sub>1</sub> ( <i>t</i> ), мВ | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,94 |

Установившееся значение регулируемого параметра [92] для системы с выбранным дискретным регулятором при  $K_p = 85,0$ 

$$\lim_{z \to 1} (1 - z^{-1}) U_1(z) = \lim_{z \to 1} \frac{z - 1}{z} \cdot \frac{4,549z^4 - 6,431z^3 + 3,030z^2 - 0,287z}{5,549z^4 - 9,386z^3 + 6,502z^2 - 2,192z + 0,416} \cdot \frac{z}{z - 1} =$$

= 0,861/0,889 = 0,969 и статическая ошибка равна 0,031.

При  $K_p = 150,0$  выражение (8.25) после упрощения принимает вид

$$G_p(z)G_{ho}G_{yn}(z) = \frac{8,085z^4 - 11,43z^3 + 5,385z^2 - 0,51z}{z^4 - 2,955z^3 + 3,472z^2 - 1,905z + 0,416},$$
(8.29)

а передаточная функция замкнутой системы управления

$$G_{3am}(z) = \frac{U_1(z)}{U_2(z)} = \frac{8,085z^4 - 11,43z^3 + 5,385z^2 - 0,51z}{9,085z^4 - 14,385z^3 + 8,857z^2 - 2,415z + 0,416}$$

Если подать единичное возмущение  $U_2(z) = z/(z-1)$ , тогда

$$U_1(z) = \frac{0,808z^5 - 1,1433z^4 + 0,538z^3 - 0,051z^2}{0,909z^5 - 2,347z^4 + 2,324z^3 - 1,127z^2 + 0,283z - 0,0416}.$$
 (8.30)

Результаты вычислений по этому выражению приведены в таблице 8.5 и на рисунке 8.8 (кривая 3).

Таблица 8.5

| 1000                                   | ци о.е |      |      |      |      |      |      |
|--|--------|------|------|------|------|------|------|
| <i>t</i> , c                           | 0,1    | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  |
| <i>U</i> <sub>1</sub> ( <i>t</i> ), мВ | 0,89   | 1,04 | 1,00 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 |

Продолжение таблицы 8.5

| <i>t</i> , c  | 0,8  | 0,9  | 1,0  | 1,1  | 1,2  | 1,3  | 1,4  |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $U_1(t)$ , мВ | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |

Установившееся значение регулируемого параметра [92] для системы с выбранным дискретным регулятором при  $K_p = 150,0$ 

$$\lim_{z \to 1} (1 - z^{-1}) U_1(z) = \lim_{z \to 1} \frac{z - 1}{z} \cdot \frac{8,085z^4 - 11,43z^3 + 5,385z^2 - 0,51z}{9,085z^4 - 14,385z^3 + 8,857z^2 - 2,415z + 0,416} \cdot \frac{z}{z - 1} =$$

= 1,530/1,558 = 0,982 и статическая ошибка равна 0,018.

При К<sub>p</sub> = 500,0 выражение (8.25) после упрощения принимает вид

$$G_p(z)G_{ho}G_{yn}(z) = \frac{26,95z^4 - 38,10z^3 + 17,95z^2 - 1,70z}{z^4 - 2,955z^3 + 3,472z^2 - 1,905z + 0,416},$$

а передаточная функция замкнутой системы управления

$$G_{3am}(z) = \frac{U_1(z)}{U_2(z)} = \frac{26,95z^4 - 38,10z^3 + 17,95z^2 - 1,70z}{27,95z^4 - 41,055z^3 + 21,422z^2 - 3,605z + 0,416}$$

Если подать единичное возмущение  $U_2(z) = z/(z-1)$ , тогда

$$U_1(z) = \frac{2,695z^5 - 3,810z^4 + 1,795z^3 - 0,170z^2}{2,795z^5 - 6,901z^4 + 6,248z^3 - 2,503z^2 + 0,402z - 0,0416}.$$
 (8.31)

Результаты вычислений по этому выражению приведены в таблице 8.6 и на рисунке 8.8 (кривая 3).

Таблица 8.6

| <i>t</i> , c                           | 0,1   | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,7   |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>U</i> <sub>1</sub> ( <i>t</i> ), мВ | 0,964 | 1,018 | 0,999 | 0,995 | 0,996 | 0,997 | 0,998 |

Продолжение таблицы 8.6

| <i>t</i> , c | 0,8   | 0,9   | 1,0   | 1,1   | 1,2   | 1,3   | 1,4   |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $U_1(t), MB$ | 0,999 | 1,001 | 1,002 | 1,003 | 1,004 | 1,004 | 1,003 |



Рисунок 8.8 - Переходные характеристики замкнутой САУ амплитудой возмущений давления в устройстве с горизонтальной трубкой с выбранным регулятором

Установившееся значение регулируемого параметра [92] для системы с выбранным дискретным регулятором при  $K_p = 500,0$ 

$$\lim_{z \to 1} (1 - z^{-1}) U_1(z) = \lim_{z \to 1} \frac{z - 1}{z} \cdot \frac{26,95z^4 - 38,10z^3 + 17,95z^2 - 1,70z}{27,95z^4 - 41,055z^3 + 21,422z^2 - 3,605z + 0,416} \cdot \frac{z}{z - 1} = 5,100/5,128 = 0,999$$
и статическая ошибка близка к нулю.

Из переходных характеристик замкнутой САУ амплитудой возмущений давления в устройстве с горизонтальной трубкой (рисунок 8.8) следует, что

при коэффициенте регулятора  $K_p > 150,0$  переходный процесс практически полностью завершается за время, меньшее 0,2с, а при  $K_p > 85,0$  – переходный процесс завершается за время, меньшее 0,4 с. Эти промежутки времени завершения переходного процесса в САУ, показывают, что через эти промежутки времени можно подавать в систему управления следующее единичное возмущение.

В отношении контроля герметичности изделий при использовании периодических возмущений давления пробной среды можно выделить два варианта. Первый вариант контроля герметичности состоит в том, что САУ периодических возмущений давления пробной среды в изделии работает непрерывно в течение всего времени испытаний, например, равного 60 с. Другой вариант контроля герметичности изделий состоит в том, что САУ амплитудой возмущений давления в системе испытаний включается в работу только в самом начале и в конце промежутка времени отведенного на контроль герметичности изделия. В течение времени испытаний изделия САУ находится в выключенном состоянии, то есть, не подает возмущения давления в систему испытаний.



На рисунке 8.9 приведены кривые последовательно подаваемых

Рисунок 8.9 – Последовательно подаваемые через 0,4 с единичные возмущения (кривая 1) и переходные характеристики (кривая 2) замкнутой САУ амплитудой возмущений давления в устройствах с горизонтальной трубкой при непрерывной ее работе

через 0,4 с единичных возмущений (кривая 1) и последовательно формируемые переходные характеристики (кривая 2) непрерывно работающей замкнутой САУ амплитудой возмущений давления в устройствах с горизонтальной трубкой.

На рисунке 8.10 приведены кривые последовательно подаваемых через 0,2 с единичных возмущений (кривая 1) и переходные характеристики (кривая 2) замкнутой САУ амплитудой возмущений давления в устройствах с горизонтальной трубкой при непрерывной ее работе.



Рисунок 8.10 – Последовательно подаваемые через 0,2 с единичные возмущения (кривая 1) и переходные характеристики (кривая 2) замкнутой САУ амплитудой возмущений давления в устройствах с горизонтальной трубкой при непрерывной ее работе

На основании теоретических положений, рассмотренных в главе 3, о том, что снижение давления в изделии от утечек среды смещает фазовые траектории, не изменяя их вида при неизменном возмущении, проведем аналогичное смещение переходных характеристик с учетом снижения давления в изделии. То есть, проведем графическое алгебраическое суммирование снижение давления в изделии и переходных характеристик.

На рисунке 8.11 приведены последовательно формируемые переходные характеристики (кривая 1) через промежутки времени, равные 0,4 с, при непрерывно работающей замкнутой САУ амплитудой возмущений давления в устройствах с горизонтальной трубкой с учетом снижения давления в изделии (прямая 2), контролируемом на герметичность.



Рисунок 8.11 - Последовательно формируемые переходные характеристики (кривая 1) через промежутки времени, равные 0,4 с, при непрерывно работающей замкнутой САУ амплитудой возмущений давления в устройствах с горизонтальной трубкой с учетом снижения давления в изделии (прямая 2), контролируемом на герметичность

На рисунке 8.12 приведены последовательно формируемые переходные характеристики (кривая 1) через промежутки времени, равные 0,2 с, при непрерывно работающей замкнутой САУ амплитудой возмущений давления в устройствах с горизонтальной трубкой с учетом снижения давления в изделии (прямая 2), контролируемом на герметичность.

Таким образом, разработанная САУ амплитудой возмущений давления пробной среды в устройстве автоматизированного контроля герметичности изделий представляет собой следящую систему управления, которая работает по заданной от ЭВМ программе и поддерживает заданные значения амплитуды. Наиболее рациональной программой управляющих сигналов являются прямоугольный сигнал заданной амплитуды и частоты.

По установленным кривым переходного процесса для САУ амплитудой колебаний возмущений давления пробной среды в изделии рациональными значениями периода изменения задающего прямоугольного сигнала являются значения большие 0,8 с потому, что переходный процесс завершается почти полностью через 0,4 –0, 5 с. Рекомендуется также к использованию вариант подачи управляющего сигнала в САУ амплитудой с частотой, равной 0,4 с. При реализации такого управляющего сигнала кривая переходного процесса начинает снижаться после первого максимального значения.



Рисунок 8.12 - Последовательно формируемые переходные характеристики (кривая 1) через промежутки времени, равные 0,2 с, при непрерывно работающей замкнутой САУ амплитудой возмущений давления в устройствах с горизонтальной трубкой с учетом снижения давления в изделии (прямая 2), контролируемом на герметичность

#### 8.1.5 Частотные характеристики САУ амплитудой периодических возмущений давления газа с выбранным регулятором при контроле герметичности изделий устройством с горизонтальной трубкой

Передаточная функция (8.25) разомкнутой САУ амплитудой периодических возмущений давления пробного газа при контроле герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки и с выбранным регулятором

$$G_p(z)G_{ho}G_{yn}(z) = \frac{0,091 \cdot K_p \left(0,591z^4 - 0,837z^3 + 0,394z^2 - 0,0375z\right)}{z^4 - 2,955z^3 + 3,472z^2 - 1,905z + 0,416}.$$
 (8.32)

При построении частотных характеристик на W - плоскости принимают z в соответствии с выражением (8.11)  $z = (1 + i\omega_w)/(1 - i\omega_w)$ . Выражение (8.32) принимает вид

$$G_{p}(i\omega)G_{ho}G_{yn}(i\omega) = \frac{0,091 \cdot K_{p} \left[ \left( 3,6+4,8\omega_{w}^{2}+18,0\omega_{w}^{4} \right) + i \left( 4,4\omega_{w}+21,2\omega_{w}^{3} \right) \right]}{\left[ \left( 0,028-1,552\omega_{w}^{2}+9,748\omega_{w}^{4} \right) + i \left( 0,236\omega_{w}-4,436\omega_{w}^{3} \right) \right]}.$$
 (8.33)

Для исключения мнимого числа в знаменателе домножаем знаменатель и числитель выражения (8.33) на сопряженный знаменатель. После этих преобразований получим

$$G_{p}(i\omega)G_{ho}G_{yn}(i\omega) = \frac{0,091 \cdot K_{p} \left[ \left( 0,101 - 4,415\omega_{w}^{2} + 13,632\omega_{w}^{4} - 75,189\omega_{w}^{6} + 175,464\omega_{w}^{8} \right) \right]}{\left[ \left( 0,028 - 1,552\omega_{w}^{2} + 9,748\omega_{w}^{4} \right)^{2} + \left( 0,236\omega_{w} - 4,436\omega_{w}^{3} \right)^{2} \right]} + i\frac{0,091 \cdot K_{p} \left[ \left( -0,727\omega_{w} + 8,602\omega_{w}^{3} + 233,692\omega_{w}^{5} + 79,848\omega_{w}^{7} \right) \right]}{\left[ \left( 0,028 - 1,552\omega_{w}^{2} + 9,748\omega_{w}^{4} \right)^{2} + \left( 0,236\omega_{w} - 4,436\omega_{w}^{3} \right)^{2} \right]}.$$
 (8.34)

Вещественная и мнимая частотные функции управляемого процесса рассматриваемой САУ в соответствии с этим выражением имеют вид:

$$U_{cy}(\omega_w) = \frac{0,091 \cdot K_p \left[ \left( 0,101 - 4,415\omega_w^2 + 13,632\omega_w^4 - 75,189\omega_w^6 + 175,464\omega_w^8 \right) \right]}{\left[ \left( 0,028 - 1,552\omega_w^2 + 9,748\omega_w^4 \right)^2 + \left( 0,236\omega_w - 4,436\omega_w^3 \right)^2 \right]}, \quad (8.35)$$

$$V_{cy}(\omega_w) = \frac{0,091 \cdot K_p \left[ \left( -0,727\,\omega_w + 8,602\,\omega_w^3 + 233,692\,\omega_w^5 + 79,848\,\omega_w^7 \right) \right]}{\left[ \left( 0,028 - 1,552\,\omega_w^2 + 9,748\,\omega_w^4 \right)^2 + \left( 0,236\,\omega_w - 4,436\,\omega_w^3 \right)^2 \right]}.(8.36)$$

Определяем амплитудную и фазовую частотные характеристики разомкнутой системы управления с регулятором управляемого процесса по выражениям, аналогичным (8.16) и (8.17

$$A_{cy}(\omega_w) = \sqrt{U_{cy}^2(\omega_w) + V_{cy}^2(\omega_w)}, \quad \varphi_{cy}(\omega_w) = arktg \frac{V_{cy}(\omega_w)}{U_{cy}(\omega_w)}.$$
(8.37)

$$A_{cy}(\omega_{w}) = \frac{0,091 \cdot K_{p}}{\left[\left(0,028 - 1,552 \,\omega_{w}^{2} + 9,748 \,\omega_{w}^{4}\right)^{2} + \left(0,236 \,\omega_{w} - 4,436 \,\omega_{w}^{3}\right)^{2}\right]} \cdot \left[\left(0,101 - 4,415 \,\omega_{w}^{2} + 13,632 \,\omega_{w}^{4} - 75,189 \,\omega_{w}^{6} + 175,464 \,\omega_{w}^{8}\right)^{2} + \left(-0,727 \,\omega_{w} + 8,602 \,\omega_{w}^{3} + 233,692 \,\omega_{w}^{5} + 79,848 \,\omega_{w}^{7}\right)^{2}\right]^{\frac{1}{2}}.$$

Если принять  $K_p = 100$ , взять десятичный логарифм от этого выражения и умножить его обе части на 20, тогда получим

$$20 \lg A_{cy}(\omega_w) = 20 \lg 9,1 + 20 \lg \left[ \left( 0,101 - 4,415\omega_w^2 + 13,632\omega_w^4 - 75,189\omega_w^6 + 175,464\omega_w^8 \right)^2 + 10 \lg \left[ \left( 0,101 - 4,415\omega_w^2 + 13,632\omega_w^4 - 75,189\omega_w^6 + 175,464\omega_w^8 \right)^2 + 10 \lg \left[ \left( 0,101 - 4,415\omega_w^2 + 13,632\omega_w^4 - 75,189\omega_w^6 + 175,464\omega_w^8 \right)^2 + 10 \lg \left[ \left( 0,101 - 4,415\omega_w^2 + 13,632\omega_w^4 - 75,189\omega_w^6 + 175,464\omega_w^8 \right)^2 + 10 \lg \left[ \left( 0,101 - 4,415\omega_w^2 + 13,632\omega_w^4 - 75,189\omega_w^6 + 10 \lg \right)^2 \right] \right] \right]$$

$$+ \left(-0,727 \ \omega_{w} + 8,602 \ \omega_{w}^{3} + 233 \ ,692 \ \omega_{w}^{5} + 79 \ ,848 \ \omega_{w}^{7} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}} - \\- 20 \log \left[ \left(0,028 - 1,552 \ \omega_{w}^{2} + 9,748 \ \omega_{w}^{4} \right)^{2} + \left(0,236 \ \omega_{w} - 4,436 \ \omega_{w}^{3} \right)^{2} \right].$$

Так как lgN = 0,434lnN и, принимая обозначение  $20 \lg A_{cy}(\omega_w) = L_{cy}(\omega_w)$ , предыдущее выражение принимает вид

$$L_{cy}(\omega_w) = 8,68 \{ \ln 9, 1 + \ln \left[ \left( 0,101 - 4,415 \,\omega_w^2 + 13,632 \,\omega_w^4 - 75,189 \,\omega_w^6 + 175,464 \,\omega_w^8 \right)^2 + 100 \,\omega_w^4 + 100 \,$$

$$+ \left(-0,727 \ \omega_{w} + 8,602 \ \omega_{w}^{3} + 233 \ ,692 \ \omega_{w}^{5} + 79 \ ,848 \ \omega_{w}^{7}\right)^{2}\right]^{\frac{1}{2}} - \\ - \ln\left[\left(0,028 - 1,552 \ \omega_{w}^{2} + 9,748 \ \omega_{w}^{4}\right)^{2} + \left(0,236 \ \omega_{w} - 4,436 \ \omega_{w}^{3}\right)^{2}\right]\right] \cdot (8.38)$$

Результаты вычислений по выражению (8.38) приведены в таблице 8.7 и на рисунке 8.13 (кривая 3).

| Таблица 8.7                           |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|--|
| $\omega_w, c^{-1}$                    | 0,00  | 0,001 | 0,1   | 0,2   | 0,5   | 1,0   | 10,0  |  |  |  |
| $L_{vn}(\omega), \partial \mathbf{E}$ | 61,33 | 61,32 | 61,28 | 26,40 | 49,85 | 31,16 | 14,61 |  |  |  |

Фазочастотная характеристика разомкнутой САУ амплитуды возмущений давления газа в устройстве испытаний в соответствии с выражениями (8.35), (8.36) и (8.37)

$$\varphi_{cy}(\omega_w) = arktg \frac{\left(-0.727\omega_w + 8.602\omega_w^3 + 233.692\omega_w^5 + 79.848\omega_w^7\right)}{\left(0.101 - 4.415\omega_w^2 + 13.632\omega_w^4 - 75.189\omega_w^6 + 175.464\omega_w^8\right)}.$$
 (8.39)

Результаты вычислений по выражению (8.39) приведены в таблице 8.8 и на рисунке 8.13 (кривая 4).

| Таблица | 8  | 8 |  |
|---------|----|---|--|
| гаолица | υ. | 0 |  |

| $\omega_w, c^{-1}$           | 0,001  | 0,1    | 0,2    | 0,5   | 1,0    | 10,0  |
|------------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|
| $arphi_{yn}(arphi_w),$ град. | -179,8 | -133,2 | -179,5 | -94,0 | -109,2 | -93,6 |



Рисунок 8.13 – Логарифмические амплитудная (кривые 1, 3) и фазовые (кривые 2, 4) частотные характеристики разомкнутой САУ амплитудой периодических возмущений давления газа при контроле герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки без регулятора (кривые 1, 2) и с выбранным по логарифмическим частотным характеристикам управляемого процесса регулятором (кривые 3, 4)

Логарифмические амплитудная и фазовая частотные характеристики для САУ амплитудой периодических возмущений давления газа построены при периоде квантования сигнала цифровой системой управления T = 0,1 с.

Как видно из логарифмической амплитудной частотной характеристики (рисунок 8.13 кривая 3) на частотах близких к 0,2 с<sup>-1</sup> в проектируемой САУ амплитуда колебаний резко снижается. Возможны автоколебания на частотах близких к 0,2 с<sup>-1</sup> потому, что сдвиг по фазе составляет –179,5 градуса. На рабочей частоте квантования и работы САУ запас по фазе составляет 47<sup>0</sup>. Запас по амплитуде на рабочей частоте составляет 61,3 дБ.

Проектируемая САУ содержит два звена второго порядка, относящихся к объекту управления и электромагнитному исполнительному механизму, одно из которых всегда является колебательным звеном, а другое может быть колебательным или апериодическим второго порядка в зависимости от объемов эталонной и вспомогательной емкостей и геометрических параметров горизонтальной трубки. Если объект управления будет иметь передаточную функцию в виде апериодического звена второго порядка, тогда САУ будет иметь более выраженный апериодический переходный процесс.

### 8.1.6 Реализация выбранного дискретного регулятора для САУ амплитудой возмущений давления пробной среды в виде импульсного RC – фильтра

Для перевода передаточной функции регулятора, представленной в виде z - преобразования, к s - преобразованию используем формулу [92]

$$3\left[\frac{G_p(s)}{s}\right] = \frac{1}{1 - z^{-1}}G_p(z).$$
(8.40)

После подстановки выражения (8.24) в (8.40) и разложения на простые дроби

$$3\left[\frac{G_p(s)}{s}\right] = \frac{K_p z (z - 0.896)}{(z - 1)(z - 1)} = K_p \left[\frac{z^2}{(z - 1)^2} - \frac{0.896z}{(z - 1)^2}\right] = K_p \left[\frac{z}{(z - 1)^2} + \frac{z}{(z - 1)} - \frac{0.896z}{(z - 1)^2}\right] = K_p \left[\frac{1}{0.1} \cdot \frac{0.1z}{(z - 1)^2} + \frac{z}{(z - 1)} - 0.896 \cdot \frac{1}{0.1} \cdot \frac{0.1z}{(z - 1)^2}\right].$$

$$(8.41)$$

В этом выражении знаменатель и числитель первого и третьего слагаемого в квадратных скобках умножили на период квантования T = 0,1 с потому, что в таблицах перехода от z - преобразования к s - преобразованию имеется множитель T.

После перехода от z - преобразования к s - преобразованию получим

$$\frac{G_p(s)}{s} = K_p \left[ \frac{1}{0,1} \cdot \frac{1}{s^2} + \frac{1}{s} - 0,896 \cdot \frac{1}{0,1} \cdot \frac{1}{s^2} \right] = K_p \left[ \frac{1,04}{s^2} + \frac{1}{s} \right] = K_p \left[ \frac{1,04s + s^2}{s^2} \right]$$

ИЛИ

$$G_p(s) = K_p \frac{1,04+s}{s} = 1,04K_p \frac{(0,962s+1)}{s}.$$
(8.42)

Принимая, например, *К*<sub>*p*</sub>=100,0, получим

$$G_p(s) = \frac{(0,962s+1)}{0,00962s}.$$
(8.43)

Пропорционально-интегральный RC - контур имеет принципиальную схему, приведенную на рисунке 8.14, и передаточную функцию

$$W(s) = \frac{(T_1 s + 1)}{T_2 s} = \frac{(R_{oc} C_1 s + 1)}{R_{ox} C_1 s}.$$
(8.44)



Рисунок 8.14 – Принципиальная схема импульсного пропорциональноинтегрального RC - контура, реализующего выбранный дискретный регулятор

Сопоставляя эти две передаточные функции, устанавливаем, что  $T_1 = 0,962 = R_{oc} \cdot C_1$  и  $T_2 = 0,00962 = R_{ex} \cdot C_1$ . Принимаем  $R_{ex} = 1$  кОм, тогда  $R_{oc} = 100,0$  кОм и  $C_1 = 9,62$  мФ.

#### 8.1.7 Установившиеся ошибки САУ амплитудой периодических возмущений давления газа с выбранным регулятором при контроле герметичности изделий устройствами с горизонтальной трубки

Установившаяся ошибка по положению  $\Delta U_{ycm}^{noложению}(t)$  (рисунок 8.5) для цифровых систем управления определяется по формуле [92]

$$e_{ycm}^{nonowenuo}(t) = \Delta U_{ycm}^{nonowenuo}(t) = \frac{R(t)}{1 + \lim_{z \to 1} GH(z)},$$
(8.45)

где R(t) - управляющее воздействие для САУ амплитудой возмущений давления [согласно рисунку 8.5  $R(t) = U_2(t)$ ];

*GH(z)* – передаточная функция рассматриваемой разомкнутой САУ. После подстановки, например, выражения (8.29) в (8.45) получим

$$\Delta U_{ycm}^{nonoscenuo}(t) = \frac{U_2(t)}{1 + \lim_{z \to 1} \frac{8,085z^4 - 11,43z^3 + 5,385z^2 - 0,51z}{z^4 - 2,955z^3 + 3,472z^2 - 1,905z + 0,416}} = \frac{U_2(t)}{1 + \frac{1,45}{0,028}} = \frac{U_2(t)}{52,79}$$

Если, например,  $U_2(t)$ = 1мВ, тогда  $\Delta U_{ycm}^{nonoscenuo}(t) = 0,019$ . В процентах от значения 1,0 мВ ошибка составляет 1.9 %.

Установившееся ошибка по скорости для цифровых систем управления определим по методике [91].

Передаточная функция ошибки управления по передаточной функции разомкнутой САУ определяется по формуле

$$\Delta U(z) = \frac{1}{1 + G_p(z)G_{ho}G_{yn}(z)}$$

или с учетом выражения (8.29)

$$\Delta U(z) = \frac{z^4 - 2,955z^3 + 3,472z^2 - 1,905z + 0,436}{9,085z^4 - 14,389z^3 + 8,94z^2 - 2,48z + 0,436}$$

Коэффициент ошибки по скорости  $K_C$ , B/c, для цифровых систем управления определяется как первая производная [91] при z = 1

$$K_{C} = \frac{\partial [\Delta U(z)]}{\partial z} = \frac{(9,085z^{4} - 14,389z^{3} + 8,94z^{2} - 2,48z + 0,436)(4z^{3} - 8,865z^{2} + 6,944z - 1,905)}{(9,085z^{4} - 14,389z^{3} + 8,94z^{2} - 2,48z + 0,436)^{2}} - \frac{\partial [\Delta U(z)]}{\partial z} = \frac{\partial [\Delta U($$

$$-\frac{\left(z^4 - 2,955z^3 + 3,472z^2 - 1,905z + 0,416\right)\left(36,34z^3 - 43,147z^2 + 17,88z - 2,48\right)}{\left(9,085z^4 - 14,389z^3 + 8,94z^2 - 2,48z + 0,436\right)^2} = 0,014.$$

Таким образом, коэффициент ошибки по скорости САУ амплитудой возмущений давления составляет 0,014 В/с.

8.2 Анализ САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке устройства контроля герметичности с пузырьковой камерой

#### 8.2.1 Влияние коэффициентов дискретного ПИД регулятора на переходные характеристики САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке при периоде возмущений T = 2 с

Для более детального анализа и синтеза систем автоматического управления и уменьшения вычислений рассмотрена система автоматического управления амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке (рисунок 7.5). Барботажная трубка может иметь сравнительно больший диаметр, чем диаметр горизонтальной трубки в системе автоматического регулирования амплитуды возмущений давления, и система автоматического управления уровнем жидкости в барботажной трубке является для системы автоматического контроля герметичности изделий вспомогательной, поэтому можно не учитывать влияние капиллярных сил на изменение уровня жидкости.

В этом случае управляемый процесс САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке имеет структурную схему, приведенную на рисунке 8.4, в которой между сигналами  $P_2$  и  $X_1$  расположено звено с передаточной функцией  $K_5$ . Передаточная функция управляемого процесса  $G_{yn}(s)$ , согласно видоизмененной структурной схеме САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры при передаточной функции электрического моторного исполнительного механизма  $\kappa_4/s$ , имеет вид

$$G_{yn}(s) = \frac{K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_E T_E K_y}{(T_1 s + 1)(T_E s + 1)}.$$
(8.46)

Влияние коэффициентов дискретного ПИД регулятора на переходные характеристики САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке при периоде между возмущениями T = 2 с отражено на рисунке 8.15.



САУ с дискретным ПИД регулятором при  $K_p = 2,0$  и  $K_I = 1,929$ : 1 -  $K_d = 0,5$ ; 2 -  $K_d = 1,0$ ; 3 -  $K_d = 2,0$ ; 4 - САУ с дискретным ПИ регулятором при  $K_p = 2,0$  и  $K_I = 1,929$ ; 5 - САУ с минимальным временем переходного процесса

Рисунок 8.15 – Переходные характеристики замкнутой САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры при периоде между возмущениями T = 2 с

На основании данных, полученных для построения кривой 1 (рисунок 8.15), установлено: время регулирования  $t_p = 6$  с, (то есть, равно трем тактам возмущений); скорость отработки регулируемой величины  $(dx/dt)_{\text{max}} = (dU_1/dt)_{\text{max}} = 1$ ед. за 2 с = 0,5 ед/с; перерегулирование составляет 1,8 %.

Проведен синтез дискретной САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке с апериодическим переходным процессом в течение одного такта квантования, используя, например, дискретный регулятор «как отражение передаточной функции управляемого процесса» [92]. График переходного процесса приведен на рисунке 8.15 (кривая 5)

#### 8.2.2 Влияние коэффициентов дискретного ПИ регулятора на переходные характеристики и устойчивость САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке при периоде возмущений T = 3 с

Влияние коэффициентов дискретного ПИ регулятора на переходные характеристики и устойчивость САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в

барботажной трубке при периоде между возмущениями T = 3 с отражено на рисунке 8.16.



1 -  $K_p = 2,0$ ,  $K_I = 1,286$ ; 2 -  $K_p = 1,2$ ,  $K_I = 0,772$ ; 3 -  $K_p = 4,0$ ,  $K_I = 2,572$ Рисунок 8.16 – Переходные характеристики замкнутой САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры при периоде между возмущениями T = 3 с с дискретным ПИ регулятором при K = 50

### 8.2.3 Влияние коэффициентов дискретных ПИ и ПИД регуляторов на переходные характеристики САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке при периоде возмущений T = 10 с

Влияние коэффициентов дискретных ПИ и ПИД регуляторов на переходные характеристики САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке при периоде возмущений T = 10 с отражено на рисунке 8.17.



САУ с дискретным ПИ регулятором: 1 -  $K_p = 1,2$ ;  $K_I = 0,24$ ; 2 -  $K_p = 2,0$ ,  $K_I = 0,40$ ; САУ с дискретным ПИД регулятором: 3 -  $K_p = 2,0$ ,  $K_I = 0,386$ ;  $K_d = 0,5$ ; 4 -  $K_p = 2,0$ ,  $K_I = 0,386$ ;  $K_d = 2,0$ 

Рисунок 8.17 – Переходные характеристики замкнутой САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры при периоде возмущений T = 10 с

На рисунке 8.18 приведены переходные характеристики замкнутой САУ с дискретным ПИ регулятором амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры для периодов возмущений T = 2, 3 и 10 с (по две переходные характеристики для каждого периода возмущений).

Данные, по которым построены кривые 1 - 6 на рисунке 8.18, приведены в таблицах 8.9 и 8.10.

Таблица 8.9 - Сравнительные данные для дискретного ПИ регулятора при  $K_p = 1,2$  к рисункам 8.18 и 8.19 (кривая 1 - T = 2c,  $K_I = 1,158$ ; кривая 3 - T = 3c,  $K_I = 0,772$ ; кривая 5 - T = 10c,  $K_I = 0,24$ )

| nT       | 0T | 1T    | 2T    | 3T    | 4T    | 5T    | 6T    | 7T    | 8T    | 9T    |
|----------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Кривая 1 | 0  | 0,467 | 0,713 | 0,846 | 0,918 | 0,956 | 0,977 | 0,988 | 0,994 | 0,998 |
| Кривая 3 | 0  | 0,471 | 0,713 | 0,844 | 0,916 | 0,954 | 0,975 | 0,986 | 0,992 | 0,996 |
| Кривая 5 | 0  | 0,478 | 0,725 | 0,857 | 0,942 | 0,961 | 0,980 | 0,988 | 0,992 | 0,996 |

Таблица 8.10 - Сравнительные данные для ПИ регулятора при  $K_p=2,0$  к рисункам 8.18 и 8.19 (кривая 2 - T = 2c,  $K_I = 1,929$ ; кривая 4 - T = 3c,  $K_I = 1,286$ ; кривая 6 - T = 10c,  $K_I = 0,40$ )

| nT       | 0T | 1T    | 2T    | 3T    | 4T    | 5T    | 6T    | 7T    | 8T    | 9T    |
|----------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Кривая 2 | 0  | 0,773 | 0,949 | 0,989 | 0,998 | 1,000 | 1,001 | 1,002 | 1,003 | 1,003 |
| Кривая 4 | 0  | 0,785 | 0,941 | 0,984 | 0,996 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 |
| Кривая 6 | 0  | 0,786 | 0,940 | 0,984 | 0,996 | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 |



0 4 8 12 16 20 t/cпри T = 2 с: 1 -  $K_p = 1,2$  и  $K_I = 1,158$ ; 2 -  $K_p = 2,0$  и  $K_I = 1,929$ ; при T = 3 с: 3 -  $K_p = 1,2$  и  $K_I = 0,772$ ; 4 -  $K_p = 2,0$  и  $K_I = 1,286$ ; при T = 10 с: 5 -  $K_p = 1,2$  и  $K_I = 0,24$ ; 6 -  $K_p = 2,0$  и  $K_I = 0,40$ 

Рисунок 8.18 – Переходные характеристики замкнутой САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке с дискретным ПИ регулятором

По этим же таблицам 8.9 и 8.10 построены графики на рисунке 8.19, но по горизонтальной оси отложено не время в секундах, а число периодов возмущений nT. Это позволяет сопоставить графики переходных процессов для периодов возмущений T = 2, 3 и 10 с.

В отношении выбора времени квантования T необходимо отметить следующее. В рассматриваемых системах автоматизации имеется фактически амплитудно-импульсная модуляция непрерывного сигнала – давления в устройствах испытаний изделий на герметичность и его снижения от утечек среды из изделия. Благодаря периодическому замыканию и размыканию ключа квантователя систем управления через равные промежутки времени 0, 1T, 2T, ...nTформируются импульсы, амплитуда которых изменяется в зависимости от изменений непрерывного сигнала.



при T = 2 с: 1 -  $K_p = 1,2$  и  $K_I = 1,158$ ; 2 -  $K_p = 2,0$  и  $K_I = 1,929$ ; при T = 3 с: 3 -  $K_p = 1,2$  и  $K_I = 0,772$ ; 4 -  $K_p = 2,0$  и  $K_I = 1,286$ ; при T = 10 с: 5 -  $K_p = 1,2$  и  $K_I = 0,24$ ; 6 -  $K_p = 2,0$  и  $K_I = 0,40$ 

Рисунок 8.19 – Переходные характеристики замкнутой САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры с дискретным ПИ регулятором

Импульсные сигналы должны нести всю необходимую информацию, которая содержится в непрерывном сигнале. То есть, возникает вопрос - через какие промежутки времени (с какой частотой) допустимо проводить квантование непрерывного сигнала? На этот вопрос отвечает теорема Котельникова – Шеннона [79]: «Непрерывный сигнал x(t) с ограниченным частотным спектром в пределах от 0 до  $F_C$  полностью определяется последовательностью своих дискретных значений, следующих через интервал прерывания  $T \leq 1/2 F_C$ (или частоту прерывания  $f \geq 1/T = 2 F_C$ )». Основная суть этой теоремы состоит в том, что непрерывный сигнал может быть восстановлен по дискретным сигналам без искажения дополнительными частотными составляющими, если частота квантования в два раза или больше превышает предельную частоту  $F_C$  в спектре непрерывного сигнала.

Применительно к разрабатываемым системам автоматического управления испытаниями изделий на герметичность речь идет не о восстановлении непрерывного сигнала по дискретным сигналам, а о достоверности дискретного сигнала, полученного из непрерывного сигнала, при изменении времени квантования T в широком диапазоне, о возможности и достоверности работы системы автоматического управления по этим дискретным сигналам.

В разрабатываемых системах автоматизации испытаний изделий на герметичность непрерывный сигнал, который подвергается квантованию, представляет собой разность давлений между эталонной емкостью и изделием или уровень жидкости в барботажной трубке, или положение жидкостного поршня в горизонтальной трубке систем испытаний. Все эти параметры вначале испытаний стабилизируются на установленном значении и изменяются во времени при испытаниях очень медленно в зависимости от утечек пробной среды из изделия.

Таким образом, предельная (максимальная) частота  $F_C$  в спектре непрерывного сигнала равна нулю и время квантования сигнала может быть любым согласно теореме Котельникова-Шеннона.

В разрабатываемых системах автоматизации испытаний изделий на герметичность время квантования зависит от длительности испытаний конкретного типа изделия и, согласно экспериментальным данным, должно быть  $T \leq T_{\rm uc}/10$ , где  $T_{\rm uc}$  - длительность испытаний конкретного типа изделия, с. Например, если длительность испытаний конкретного изделия составляет 60 с, тогда  $T \leq 6$  с, то есть, за время испытаний изделий система автоматического управления испытаниями изделия выполнит не менее шести регулирующих воздействий на исполнительный механизм.

Таким образом, работоспособность разработанных систем автоматического управления с дискретными ПИ или ПИД регуляторами является вполне обоснованной для целой гаммы систем автоматизированного контроля герметичности изделий манометрическим, пузырьковым или гидростатическим методом.

## 8.2.4 Корневые годографы САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке при периоде возмущений T = 2 с и дискретным П или ПИ регулятором

Корневые годографы САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке при периоде между возмущениями T = 2 с построены при использовании дискретных П и ПИ регуляторов. Установлено, что замкнутая дискретная САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры при периоде возмущений T = 2 с, и П регулятором при K < 258,7 устойчива, а при K > 258,7 не устойчива. На рисунке 8.20 приведен корневой годограф этой САУ.


Рисунок 8.20 – Корневой годограф замкнутой с дискретным П регулятором САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры при периоде возмущений T = 2 с

На рисунке 8.21 приведен корневой годограф замкнутой САУ с ПИ регулятором амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры при периоде возмущений T = 2 с. Сопоставляя дискретную САУ с П регулятором (рисунок 8.20) и дискретную САУ с ПИ регулятором (рисунок 8.21), видно, что предельное значение коэффициента K = 258,7 для обеих САУ.



Рисунок 8.21 — Корневой годограф замкнутой САУ с ПИ регулятором амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры при периоде возмущений T = 2 с

Однако, САУ с ПИ регулятором (рисунок 8.21) имеет корни существенно сдвинутые вправо на *z* плоскости вплоть до z = +1. Если корни [92] расположены на горизонтальной оси на *z* плоскости и правее вертикальной оси, тогда переходный процесс апериодический. Таким образом, для рассматриваемой САУ переходный процесс при значениях K < 150 приближается к апериодическому.

Необходимо заметить, что на рисунке 8.20 и 8.21 представлены не *z*плоскости в координатах вещественной и мнимой части корней. В рассматриваемом примере САУ все корни вещественные (не имеют мнимой части), поэтому на рисунках представлены зависимости значений корней передаточной функции САУ от коэффициента *К*.

Рассматриваемая САУ с ПИД регулятором устойчива при 0 < K < 103,5. При использовании ПИ регулятора САУ устойчива при 0 < K < 258,7. Снижения K происходит за счет дополнительного усиления дифференцирующей составляющей ПИД регулятора по отношению к ПИ регулятору.

#### 8.2.5 Реализация дискретных ПИ и ПИД регуляторов для САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке в виде импульсного RC - фильтра

Дискретный ПИ регулятор САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке имеет передаточную функцию при периоде квантования T = 2c

$$G_p(z) = 1,964(z-0,018)/(z-1).$$

Согласно [92] передаточная функция четырехполюсника с передаточной функцией  $G_d(s)$ , реализующего дискретный ПИ регулятор по этому выражению, может быть определена следующим выражением

$$3\left[\frac{G_d(s)}{s}\right] = \frac{1}{1-z^{-1}} \cdot G_p(z) = \frac{1}{1-z^{-1}} \cdot \frac{1,9646 \cdot (z-0,018)}{(z-1)},$$

по которому определяем, что  $G_d(s) = (2,0367s + 1)/1,0367 \cdot s$ .

Пропорционально-интегральный контур имеет принципиальную схему, приведенную на рисунке 8.22, и передаточную функцию

$$W(s) = (T_1 s + 1)/T_2 s = (R_{oc} C_1 s + 1)/R_{ex} C_1 s$$
.

Сопоставляя эти две передаточные функции, устанавливаем, что  $T_1 = 2,0367 = R_{oc} \cdot C_1$  и  $T_2 = 1,0367 = R_{ex} \cdot C_1$ . Принимаем  $R_{ex} = 100$  кОм, тогда  $R_{oc} = 196,4$  кОм и  $C_1 = 10,3$  мФ.

Дискретный ПИД регулятор САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке имеет передаточную функцию

$$G_p(s) = (4,179z^2 - 0,5712z + 0,25)/z(z-1)$$

при периоде квантования T = 2 с. Передаточная функция четырехполюсника  $G_d(s)$ , реализующего дискретный ПИД регулятор с этой передаточной функцией, определена аналогично как и для ПИ регулятора и имеет вид

$$G_d(s) = 1,804(0,139s^2 + 2,375s + 1)/s$$
.



Рисунок 8.22 – Принципиальная схема пропорционально-интегрального контура, реализующего дискретный ПИ регулятор

Пропорционально - интегрально – дифференцирующий контур имеет принципиальную схему, приведенную на рисунке 8.23, и передаточную функцию



Рисунок 8.23 – Принципиальная схема пропорционально -интегрально – дифференцирующего контура, реализующего дискретный ПИД регулятор

Сопоставляя эти две передаточные функции, устанавливаем, что  $K = 1,804; T_1T_2 = 0,139; T_1 + T_2 = 2,375; T_1 = 0,139/T_2; 0,139/T_2 + T_2 = 2,375; 0,139 + T_2^2 = 2,375 T_2; T_2^2 - 2,375 T_2 + 0,139 + = 0; или T_2 = 1,187 + 1,127 = 2,314; <math>T_2^2 = 1,187 - 1,127 = 0,06; T_1 = \frac{0,139}{2,314} = 0,06; T_1^2 = \frac{0,139}{0,06} = 2,314.$ 

Для пропорционально - интегрально – дифференцирующего контура:  $K = 1/R_{ex} \cdot C_{oc}$ ;  $T_1 = R_{oc} \cdot C_{oc}$ ;  $T_2 = R_{ex} \cdot C_{ex}$ , тогда  $1,804 = 1/R_{ex} \cdot C_{oc}$ ; 0,06 =  $R_{oc} \cdot C_{oc}$ ; 2,314 =  $R_{ex} \cdot C_{ex}$ . Принимаем, например,  $R_{ex}$  =10 кОм, тогда  $C_{oc}$  = 55 мФ;  $R_{oc}$  = 1,09 кОм;  $C_{ex}$  = 231,4 мФ.

### 8.2.6 Реализация на ЭВМ дискретных ПИ и ПИД регуляторов для САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке

Передаточная функция дискретного ПИ регулятора при значениях T = 2 с;  $K_p = 1$  и  $K_i = 0,9646$ , при которых рассматривался дискретный ПИ регулятор в САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке, принимает значение

$$G_p^{\Pi M}(z) = 1 + 0.96462(z+1)/(z-1).$$

Структурная схема параллельного программирования этой передаточной функции дискретного ПИ регулятора на ЭВМ для САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке представлена на рисунке 8.24.



Рисунок 8.24 — Структурная схема параллельного программирования на ЭВМ передаточной функции дискретного ПИ регулятора для САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке

Для дискретного ПИД регулятора САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке при T = 2;  $K_p = 2,0$ ;  $K_i = 1,929$  и  $K_d = 0,5$  передаточная функция

$$G_{p}^{\Pi H \square}(z) = 2 + 1,929(z+1)/(z-1) + 0,25(z-1)/z$$

Структурная схема параллельного программирования этой передаточной функции дискретного ПИД регулятора на ЭВМ для САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке представлена на рисунке 8.25.



Рисунок 8.25 – Структурная схема параллельного программирования передаточной функции на ЭВМ дискретного ПИД регулятора САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке

# 8.2.7 Логарифмические частотные характеристики дискретной САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке с П или ПИ регулятором

Анализ дискретной САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке в частотной области проводится с использованием логарифмических частотных характеристик и билинейного преобразования передаточных функций [92], при котором в передаточной функции заменяют переменную *z* выражением

$$z = (1 + iw_w)/(1 - iw_w),$$

где *w*<sub>w</sub>-частота, Гц, используемая при анализе САУ на плоскости *W*.

Для разомкнутой дискретной с  $\Pi$  регулятором САУ амплитуды возмущений уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры при T = 2 с, передаточная функция имеет вид

$$G_{np}(z)G_{h0}G_{vn}(z) = K \cdot 10^{-4} (39,36z+0,0116)/z \cdot (z-0,018).$$

Передаточная функция разомкнутой САУ с дискретным ПИ регулятором

$$G_{h0}G_{vn}(z)G_{p}(z) = 3,929 \cdot K \cdot 10^{-4} \cdot (39,36 \cdot z + 0,0116)/z(z-1).$$

Частотные характеристики САУ амплитуды возмущений уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры с дискретными П и ПИ регуляторами при T = 2 с приведены на рисунке 8.26.



САУ с дискретным П регулятором: 1, 2 – амплитудные частотные характеристики при K = 50 и 250; 5 – фазовая частотная характеристика; САУ с дискретным ПИ регулятором: 3, 4 – амплитудные частотные характеристики при K = 50 и 250; 6 – фазовая частотная характеристика

Рисунок 8.26 – Частотные характеристики САУ амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке

### 9 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАН-НОГО КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ ДАВЛЕНИЯ ПРОБНОЙ СРЕДЫ

9.1 Лабораторная установка автоматизированного контроля герметичности изделий при периодических возмущениях давления пробной среды

На рисунке 9.1 представлена фотография лабораторной установки для испытаний изделий на герметичность устройством с использованием горизонтальной трубки с жидкостным поршнем при периодических возмущениях давления пробной среды.



Рисунок 9.1 - Лабораторная установка для испытаний изделий на герметичность

На рисунке 9.2 приведена функциональная схема лабораторной установки автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использовани-

ем горизонтальных трубок, в которой за основу взято устройство, представленное на рисунке 7.11.



Рисунок 9.2 – Функциональная схема лабораторной установки автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием горизонтальных трубок

Лабораторная установка автоматизированного контроля герметичности изделий газом с использованием горизонтальной трубки (рисунок 9.2) содержит как и на рисунке 7.11: дополнительную эталонную емкость 1; эталонную емкость 2; электромагнитное сильфонное исполнительное устройство (сильфон 3, электромагнит 6, якорь электромагнита 4 и камера 5); вентили 7, 8, 10, 11, 13, 15, 16, 18, 20; изделие 9, испытываемое на герметичность; горизонтальные трубки 12 и 17 с жидкостными поршнями 14 и 19 и емкостными измерительными преобразователями 21 и 22 перемещения жидкостных поршней в горизонтальных трубках; усилители 23 и 26 электрических сигналов от емкостных измерительных преобразователей 21 и 22; усилитель постоянного тока 24, подаваемого на электромагнит 6; устройство связи с объектом 25 и управляющую ЭВМ 27.

Дополнительно в лабораторную установку входят: вентили 28 и 30; калиброванная на определенный объем газа трубка 29, горизонтальная трубка 31 с жидкостным поршнем 33; основание 32, которое с одной стороны закреплено на поворотном шарнире, а с другой стороны к капроновой нити 37, наматываемой на барабан 39; шкалу 34; колесо 35; груз 36; электрический двигателя 41 с планетарным редуктором; герконы 40 и усилитель 38.

### 9.2 Лабораторные исследования автоматизированного контроля герметичности изделий при периодических возмущениях давления пробной среды

Основная цель проведения лабораторных исследований автоматизированного контроля герметичности изделий при периодических возмущениях давления пробной среды состоит в том, чтобы подтвердить работоспособность разработанных систем и теоретические положения о возможности повышения точности контроля герметичности изделий при периодических возмущениях давления газа или жидкости в устройстве испытаний.

Повышение точности контроля происходит за счет того, что при периодических возмущениях давления пробной среды оказывается возможным проводить измерение перепада давлений на жидкостном поршне, возникающего от утечек среды из изделия меньше, чем перепад давлений на жидкостном поршне, создаваемый силами поверхностного натяжения жидкости в трубке.

Необходимо отметить о существенном различии между точностью измерения перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке и точностью контроля герметичности изделий, оцениваемого по точности измерения утечек пробной среды из изделия при использовании горизонтальной трубки с жидкостным поршнем.

В первом случае рассматривается только горизонтальная трубка 17 (рисунок 9.2), в которой перемещается жидкостный поршень 19. Перемещение жидкостного поршня в трубке воспринимается и преобразуется в электрический сигнал емкостным измерительным преобразователем 22, электрический сигнал усиливается и преобразуется в цифровой код в устройствах 26, 25 и выводится на экран ЭВМ 27. Основная часть погрешности этих устройств это погрешность емкостного измерительного преобразователя перемещения жидкостного поршня в электрический сигнал. Статическая характеристика этого измерительного преобразователя линейная. Перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке пропорционально вытесняемому объему газа из трубки, который равен произведению площади сечения трубки на перемещение поршня и пропорционален объему утечек газа из изделия в соответствии с выражением (3.144) в динамике или выражению (3.146) в статическом режиме. Относительная погрешность измерения массового расхода газа через горизонтальную трубку по отношению к суммарному массовому расходу газа (утечкам газа) через микрощели изделия определяется выражением (3.147).

Погрешность контроля герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки оценим по нелинейной характеристике перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке без учета инерционных сил и сил вязкого трения, приведенной на рисунке 3.40. Рассматривая подобные характеристики, в работе [63] отмечается, что изменение входного сигнала в пределах  $\pm m$ , H, (рисунок 3.40) «представляет собой аддитивную погрешность», то есть, такую погрешность, которая имеет постоянное значение, не зависящее от значения измеряемой величины.

На основании этого положения правомочным является утверждение, что в работе при контроле герметичности изделий с использованием периодических возмущений давления пробной среды производится понижение погрешности измерений от значений  $\pm m$ , Н, до значений измерений непосредственно перемещений жидкостного поршня в горизонтальной трубке (не учитывая другие существенно меньшие по значениям погрешности) в соответствии с данными таблицы 3.7.

Рассмотрим конкретные примеры возможности измерений перепада давлений и перемещений жидкостного поршня в зоне нечувствительности горизонтальной трубки на лабораторной установке при периодических возмущениях давления пробной среды.

Формулы (3.189), (3.203) и (3.205), полученные различными способами, имеют одинаковый итоговый вид  $\Delta x_{ym}(t) = \Delta P_{ym}(t) V_{us} / E_z F_{mp}$ . По выражению (3.203) построена прямая 1 на рисунке 3.39, которая отражает теоретическое перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке в зависимости от приложенного к жидкостному поршню перепада давления от утечек сжатого воздуха из изделия, испытываемого на герметичность, в пределах зоны нечувствительности перемещения жидкостного поршня от перепада давления, при подаче периодических возмущений по давлению в устройство испытаний.

Теоретическая прямая 1 из рисунка 3.39 перенесена на рисунок 9.4 (прямая 1) с той целью, чтобы сопоставить теоретические и экспериментальные результаты взаимосвязи между перемещением жидкостного поршня и приложенным перепадом давлений от утечек газа из изделия при периодических возмущениях давления пробного газа.

Перепад давлений, который создается на жидкостном поршне в горизонтальной трубке за счет сил поверхностного натяжения,  $\Delta P_n$  Па, определяется по формуле Лапласа  $\Delta P_n = 4\sigma_{\mathcal{H}}/d_{mp}$ , где  $\sigma_{\mathcal{H}}$  – поверхностное натяжение жидкости, H/м;  $d_{mp}$ - диаметр горизонтальной трубки с жидкостным поршнем, м. Для жидкостного поршня в горизонтальной трубке из воды  $\sigma_{\mathcal{H}} = 72,5 \cdot 10^{-3}$  H/м и диаметра горизонтальной трубки, равного  $4 \cdot 10^{-3}$  м, перепад давлений, который создается на жидкостном поршне в горизонтальной трубке за счет сил поверхностного натяжения  $\Delta P_n = 72,5$  Па.

При лабораторных исследованиях (рисунок 9.2) использовались: изделие 9 объемом  $V_{u_3} = 0,012 \text{ m}^3 (0,1 \text{ m} \cdot 0,4 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m});$  горизонтальные трубки 12 и 17 диаметром  $d_{mp} = 4 \text{ мм}$  и длиной (каждая) 1,5 м. Перемещения жидкостного поршня на 1 мм в каждой горизонтальной трубке соответствует объему газа, равному 0,0126 см<sup>3</sup>.

В соответствии с формулой (3.189) перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке  $\Delta x_{ym}(t)$  при  $\Delta P_n = 72,5$  Па для принятого изделия объемом, равным 0,012 м, и  $E_c = 0,127 \cdot 10^6$  Па  $\Delta x_{ym}(t) = 72,5 \cdot 0,012 \cdot 4 /(0,127 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 16 \cdot 10^{-6}) = 0,5452$  м = 545,2 мм. Аналогично установим по формуле (3.189), что при перепаде давлений на жидкостном поршне  $\Delta P_n = 15, 30, 45$  и 60 Па перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке составят 112,8; 225,6; 338,4 и 451,3 мм. Эти данные занесены в таблицу 9.1 в первые две строки.

Теоретический объем утечек из изделия может быть определен как произведение площади поперечного сечения горизонтальной трубки на перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке  $\Delta x_{meop}(t) \cdot F_m$ , мм<sup>3</sup>. Для перемещений жидкостного поршня в горизонтальной трубке, равных 112,8; 225,6; 338,4; 451,3 и 545,2 мм, теоретические значения объемов утечек газа из изделия соответствуют 1416,8; 2833,5; 4250,3; 5668,3 и 6847,7 мм<sup>3</sup> (третья строка в таблице 9.1).

Перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке, равное 112,8 мм, в соответствии с выше полученными данными, кратное числам 2, 3 и 4 относительно перемещений жидкостного поршня в трубке и равных 225,6; 338,4 и 451,3 мм. На основании этих соотношений перемещений жидкостного поршня в горизонтальной трубке в лабораторной установке (рисунок 9.2) использовалась стеклянная горизонтальная трубка 29, которая жестко зажата между двумя неподвижными вентилями 28 и 30 и имеет объем 1416,8 мм<sup>3</sup>. Диаметр этой трубки равен 4 мм, а длина – 112,8 мм.

Если в системе автоматизированного контроля герметичности изделий с горизонтальной трубкой выбрать трубку диаметром 4 мм с погрешностью измерения перемещения жидкостного поршня в трубке, равной  $\pm 0,25$  мм, тогда погрешность измерения объема газа горизонтальной трубкой диаметром 4 мм составит (согласно таблице 3.7)  $\pm 0,0063$  см<sup>3</sup>.

Принимая, что измеряемый горизонтальной трубкой объем, равный  $0,0063 \cdot 2 = 0,0126 \text{ см}^3$ , составляет 1 %, тогда объем утечек  $V_{ym} = 6,848 \text{ см}^3$ , который не может быть измерен горизонтальной трубкой из-за действия сил поверхностного натяжения жидкости, составит 608,1 %.

Увеличение точности контроля герметичности изделий с использованием горизонтальной трубки с жидкостным поршнем при использовании периодических возмущений давление пробной среды зависит от объема изделия и может достигать двух – трех порядков и отражено кривой 3 на рисунке 3.30 при

использовании горизонтальной трубки диаметром 4 мм и точности измерений, равной ± 1,0 мм.

В соответствии с ГОСТ 9544-93 [6] при контроле герметичности изделий класса герметичности A, видимых утечек не допускается, а погрешность измерения утечек не должна превышать  $\pm 0,01$  см<sup>3</sup>мин. Горизонтальная трубка диаметром 4 мм с точностью измерений утечек, равной  $\pm 0,0063$  см<sup>3</sup>, соответствует по точности требованиям, предъявляемым стандартами к точности контроля герметичности изделий класса герметичности A.

Объем утечек воздуха из изделия, который начинает сдвигать жидкостный поршень в горизонтальной трубке (таблице 9.1)  $V_{ym} = 6,848 \text{ см}^3$  и соответствует созданию перепада давления на жидкостном поршне, равного перепаду давления от сил поверхностного натяжения жидкости  $\Delta P_n = 72,5$  Па в трубке  $d_{mp} = 4$  мм. Максимальное перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке от утечек объемом  $V_{ym} = 6,848 \text{ см}^3$  составляет 545,2 мм.

Амплитуда периодических возмущений давления газа в устройстве контроля герметичности изделий выбиралась из условия создания перемещения (колебания) жидкостного поршня в горизонтальной трубке 17 (рисунок 9.2), равного 1000 мм. Объем газа при таком перемещении жидкостного поршня в трубке диаметром 4 мм составляет  $V_{ym} = \Delta x_{meop}(t) \cdot F_m = 1000 \cdot \pi 4^2/4 = 12560 \text{ мм}^3$ .

По формуле (3.189) определяем, что перепад давлений на жидкостном поршне 19 в горизонтальной трубке 17 при перемещении жидкостного поршня на 1000 мм составляет  $\Delta P_{ym}(t) = \Delta x_{ym}(t) E_z F_{mp}/V_{u3} = 1,0 \cdot 0,127 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 4^2 \cdot 10^{-6}/4 \cdot 0,012 = 132,9$  Па.

Нелинейная характеристика перемещения жидкостного поршня x(t) в горизонтальной трубке устройства контроля герметичности от приложенного перепада давлений  $\Delta P(t)$  к жидкостному поршню из-за утечек газа из изделия (построенная по дифференциальному уравнению движения жидкостного поршня в горизонтальной трубке без учета инерционных сил и сил вязкого трения) представлена линиями 1 на рисунке 9.3. Периодические возмущения давления во времени в устройстве испытаний с амплитудой  $\Delta P = 132,9$  Па отражено кривой 3.

В результате периодического возмущения давления в устройстве испытаний по кривой 3 перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке во времени происходит по кривой 5. Амплитудные значения перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке от какого – либо реперного положения определяется величинами  $A_1$  и  $A_2$ . Размах колебаний составляет  $A_1$ - $A_2$ , амплитуда колебаний -  $(A_1 - A_2)/2$ .

Если при обычном контроле герметичности изделия (без периодических возмущений давления пробной среды) из него выходит часть газа в виде утечек, которые создают разность давлений на жидкостном поршне горизонтальной трубки, но этот перепад давлений меньше 72,5 Па, что соответствует горизонтальной линии правее нуля на рисунке 9.3, тогда перемещение жидкостного поршня x(t) = 0.

Допустим, что утечки газа из изделия создают на жидкостном поршне перепад давлений, равный половине от значения 72,5 Па, то есть, 36,25 Па или

другое значение в пределах от 0 до 72,5 Па. В этом случае необходимо начало кривой 3 периодического возмущения давления в устройстве испытаний сместить вправо по оси давления на 36,25 Па (или любое другое значение в пределах от 0 до 72,5 Па). Кривая 3 в этом случае занимает положения кривой 4. После графического сложения кривой 4 с нелинейной характеристикой 1 получим кривую 6.

Характерной особенностью кривой 6 является то, что она начинается со средней точки прямого участка, расположенного левее кривой 5, в то время как при перепаде давления, равного 72,5 Па, на жидкостном поршне начало кривой 6 было бы расположено в левой точке прямого участка, расположенного левее кривой 5. Второй особенностью является увеличение начального максимального значения амплитуды отклонения кривой 6 до  $A_3$ , а минимального значения амплитуды до  $A_4$  и, что особенно важно, смещение нелинейной характеристики 1 в положение 2 после первого периода колебаний перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке.



1, 2 - нелинейная характеристика перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке: исходное и смещенное положения; 3, 4 - периодиче-

ское возмущение давления во времени в устройстве испытаний при перепаде давлений на жидкостном поршне в горизонтальной трубке, равном нулю и равном половине перепада давления, создаваемого поверхностным натяжением жидкости (воды); 5, 6 - перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке во времени при возмущениях по кривым 3 и 4

Рисунок 9.3 – Графики практической реализации автоматизированного контроля герметичности изделий при периодических возмущениях давления пробной среды

Новое колебание жидкостного поршня по кривой 6 происходит симметрично новой горизонтальной оси *t*. Амплитуда колебаний перемещения жидкостного поршня определяется разностью  $A_3 - A_4 = A_1 - A_2$ . Смещение расположения горизонтальной оси – оси времени определяется, как видно по кривым 5 и 6, выражением  $(A_3 - A_4)/2 = A_3 - A_1 = \Delta x(t)$ , где  $\Delta x(t)$  перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке от перепада давлений, который равен 36,25 Па.

Экспериментальные исследования на лабораторной установке (рисунок 9.2) проводились в следующей последовательности. Заполняется вся система автоматизированного контроля герметичности изделия 9 пробным газом при закрытых вентилях 11, 15, 16, 20, 10, 30 и открытых вентилях 8, 7, 13, 18, 28. Изделие 9 при проведении лабораторных исследований выбиралось абсолютно герметичным.

Открывают вентили 13 и 18 и закрывают вентили 8, 7, 13 и 18. Испытательная установка после проведенных действий переводится в режим начала контроля герметичности изделия. Жидкостный поршень 19 в горизонтальной трубке смещен в крайнее левое нулевое положение, а жидкостный поршень 14 в горизонтальной трубке 12 смещен в крайнее правое нулевое положение.

Выдерживают систему контроля герметичности в таком состоянии в течение 60 с и убеждаются, что система герметична и жидкостные поршни 14 и 19 в горизонтальных трубках 12 и 17 не смещаются из нулевого положения.

Включают систему управления контролем герметичности изделий и осуществляют перемещение жидкостных поршней 14 и 19 на 1000 мм в горизонтальных трубках 12 и 17 вперед (в сторону увеличения показаний) с помощью сильфонного исполнительного устройства, в которое входят элементы 6, 4, 3, 5, а потом назад. Записывают положения жидкостных поршней в горизонтальных трубках в крайнем правом и крайнем левом положениях.

Закрывают вентиль 28 и медленно открывают игольчатый вентиль 30, обеспечивая плавное заполнение трубки 29 пробным газом из изделия 9. В трубку 29 поступает пробный газ в объеме 1416,8 мм<sup>3</sup>, как утечки газа из изделия, которые создают на жидкостном поршне 19 перепад давлений  $\Delta P_{ym}(t)$ , равный 15 Па (таблица 9.1). Жидкостный поршень 19 в горизонтальной трубке 17 при этом остается неподвижным на нулевом делении из-за действия поверхностного натяжения жидкости в трубке.

Включают систему управления контролем герметичности изделий и осуществляют перемещение жидкостных поршней 14 и 19 на 1000 мм в горизон-

тальных трубках 12 и 17 вперед (в сторону увеличения показаний) с помощью сильфонного исполнительного устройства, а потом назад.

Таблица 9.1 - Результаты экспериментальных исследований контроля герметичности изделий по утечкам пробного газа из изделия, на лабораторной установке (рисунок 9.2) при периодических возмущения давления пробной среды

| Перепад давлений на жидкостном поршне 19 (рисунок 9.2) от утечек газа из изделия $\Delta P_{ym}(t)$ , Па                                | 15     | 30     | 45     | 60     | 72,5   |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Теоретическое перемеще-<br>ние жидкостного поршня<br>19 в горизонтальной<br>трубке 17 [по формуле<br>(3.189)] $\Delta x_{meop}(t)$ , мм | 112,8  | 225,6  | 338,4  | 451,3  | 545,2  |
| Теоретический объем утечек из изделия, равный $\Delta x_{meop}(t) \cdot F_m$ , мм <sup>3</sup>  | 1416,8 | 2833,5 | 4250,3 | 5668,3 | 6847,7 |
| Измеренное перемещение жидкостного поршня 19 в горизонтальной трубке 17 $\Delta x_{ym}(t)$ , мм   | 102    | 216    | 337    | 461    | -      |
| Абсолютная погрешность контроля герметичности $\Delta x_{meop}(t)$ - $\Delta x_{ym}(t)$ , мм  | 10,8   | 9,6    | 1,4    | -9,7   | -      |
| Относительная погреш-<br>ность контроля герметич-<br>ности $[\Delta x_{meop}(t) - \Delta x_{vm}(t)] \cdot 100/545,2; \%$                | 1,98   | 1,76   | 0,26   | -1,78  | -      |

Записывают положения жидкостных поршней в горизонтальных трубках в крайнем правом и крайнем левом положениях. Жидкостный поршень 14 в горизонтальной трубке 12 должен возвратиться в положение, которое занимал после первого возмущающего воздействия. Жидкостный поршень 19 в горизонтальной трубке 17 занимает новое положение. Записывают это значение. Опыт по возмущению давления в системе контроля герметичности повторяют три раза и определяется среднее значение, которое в данном опыте равно 102 мм (значения перемещений жидкостного поршня записаны с точностью 1 мм).

После этого закрывают вентиль 30, открывают вентиль 28 и выпускают в атмосферу воздух из трубки 29. Закрывают вентиль 28 и набирают в трубку 29 вторую порцию газа из изделия – утечек газа объемом 1416,8 мм<sup>3</sup>. Суммарный

объем газа ушедший из изделия в виде утечек составит 2833,5 мм<sup>3</sup>, который соответствует перепаду давлений на жидкостном поршне 19 в горизонтальной трубке, равному 30 Па. Далее алгоритм опыта повторяется.

Относительная погрешность контроля герметичности по экспериментальным данным, в соответствии с таблицей 9.1, составляет около ± 2,0 %. Однако, эта погрешность представляет собой удвоенную погрешность потому, что одна часть погрешности связана с погрешностью горизонтальной трубки 29 (рисунок 9.2), с помощью которой формировались утечки газа из изделия, а другая часть погрешности связана с погрешностью горизонтальной трубки 17, с помощью которой проводился контроль герметичности изделия.

На рисунке 9.4 приведены графики перемещения жидкостного поршня в горизонтальной трубке в зависимости от приложенного к жидкостному



1 – теоретическая прямая, построенная по выражению (3.189); 2 – экспериментальная кривая

Рисунок 9.4 – Перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке в зависимости от приложенного к жидкостному поршню перепада давления от утечек сжатого воздуха из изделия, испытываемого на герметичность, в пределах зоны нечувствительности перемещения жидкостного поршня от перепада давления, при подаче периодических возмущений по давлению (перемещению жидкостного поршня) в устройство испытаний поршню перепада давления от утечек сжатого воздуха из изделия, испытываемого на герметичность, в пределах зоны нечувствительности перемещения жидкостного поршня от перепада давления, при подаче периодических возмущений по давлению в устройство испытаний (1-теоретическая прямая, построенная по выражениям (3.189), (3.203), (3.205); 2 – экспериментальная кривая).

Исследования САУ периодических возмущений давления проводились на различных режимах. Максимальные значения параметров: амплитуда периодических возмущений давления газа в устройстве контроля герметичности изделий - 1000 мм; объеме утечек газа из изделия – 6,848 см<sup>3</sup>, который соответствует созданию перепада давления на жидкостном поршне, равного перепаду давления от сил поверхностного натяжения жидкости (воды) в трубке диаметром 4 мм; перепад давления на жидкостном поршне, который соответствует возмущению перемещения жидкостного поршня 1000 мм, составляет 132,9 Па; максимальное перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке соответствует объему утечек газа, равного 6,848 см<sup>3</sup> - 545,2 мм.

Экспериментальными исследованиями на лабораторной установке подтверждены следующие основные теоретические положения:

- амплитуда перемещений жидкостного поршня в горизонтальной трубке (амплитуда фазовых траекторий) для одного и того же конструктивного исполнения горизонтальной трубки с одними и теми же изделием и эталонной емкостью определяется значением начального отклонения, то есть, возмущением;

- изменение перепада давлений на жидкостном поршне горизонтальной трубки от утечек пробного газа из изделия практически не изменяет амплитуды (теоретической формы фазовой траектории) движения жидкостного поршня, а пропорционально сдвигает амплитуду (фазовую траекторию) движения поршня, например, вправо по горизонтальной трубке;

- наложение переменной составляющей – периодических возмущений по давлению в устройстве испытаний изделий на герметичность придает нелинейному звену (горизонтальной трубке с жидкостным поршнем) свойства пропорционального линейного звена при различных значениях перепада давления на жидкостном поршне в пределах от нуля до 100 % зоны нечувствительности нелинейной характеристики перемещение жидкостного поршня в горизонтальной трубке;

- начальные значения давления в устройстве контроля герметичности изделия или снижение давления в изделии от утечек газа практически не влияют на результаты контроля герметичности изделий по амплитудам фазовых траекторий жидкостного поршня в горизонтальной трубке, то есть, метод контроля герметичности изделий при возмущениях по давлению в изделии применим для различных давлений, при которых производятся испытания изделия на герметичность;

- подтверждена возможность работы САУ амплитудой возмущений давления пробной среды в двух режимах: в непрерывном режиме в течение всего времени испытаний, равного, например, 60 - 90 с, и в периодическом режиме, при котором САУ амплитудой включается, например, на несколько тактов, в течение которых производятся измерения максимального и минимального значений амплитуды возмущений и САУ выключается на заданный промежуток времени.

САУ амплитудой возмущений давлений газа на лабораторной установке работает устойчиво при частоте квантования сигналов, равной 0,1 с. Погрешность измерения перемещения жидкостного поршня при контроле герметичности изделий газом от приложенного перепада давлений к жидкостному поршню из-за утечек газа не превышает  $\pm 2,0$ %.

# 10 Автоматизированные линии и участки испытаний изделий на герметичность

### 10.1 Автоматизированные линии непрерывного и периодического действия испытаний на герметичность автотракторных теплообменников с использованием устройств с пузырьковой камерой

Упрощенная схема автоматизированной непрерывной линии испытаний на герметичность теплообменников с использованием устройства с пузырьковой камерой приведена на рисунке 10.1, а более полная функциональная схема этой линии приведена на рисунке 10.2.



Рисунок 10.1 – Автоматизированная непрерывная линия испытаний на герметичность теплообменников с использованием устройства с пузырьковой камерой

В автоматизированную непрерывную линию испытаний на герметичность теплообменников 2 (рисунок 10.1) входят конвейер 1, блок испытаний на герметичность 9, эталонная емкость 13 и трубопроводы 12 и 3 подвода сжатого воздуха к блоку контроля и теплообменнику. В блоке испытаний на герметичность размещены электрические переключатели режимов автоматизированного контроля 4 и 6, пузырьковая камера 16 с барботажной трубкой 15, счетчик 14 пузырьков сжатого воздуха, проходящих через жидкость пузырьковой камерой, манометр 17, регулятор давления сжатого воздуха 18, световые табло 7 и 8 и дроссель 5.

Регулятор давления 18 и манометр 17 предназначены для установки необходимого давления сжатого воздуха, подводимого к теплообменнику при испытаниях на герметичность. Световые табло 7 и 8 предназначены для сигнализации о двух режимах работы блока: о заполнении системы сжатым воздухом и испытаниях на герметичность теплообменника.

Дроссель 5 предназначен для снижения уровня жидкости в барботажной трубке 15 до нижнего среза перед испытаниями на герметичность теплообменника. Расположенные на задней стенке блока 9 электромагнитные клапаны 19 и 20 предназначены для переключений при заполнении всей системы сжатым воздухом перед испытаниями на герметичность и герметизации системы при контроле герметичности теплообменника.

Испытания на герметичность теплообменников на автоматизированной линии с использованием пузырьковой камеры осуществляется в следующей последовательности. Конвейером 1 подается на пост испытаний на герметичность теплообменник 2 и подсоединяется к блоку испытаний с помощью трубопровода 3. Включается электрическое питание блока испытаний на герметичность и открывается вентиль 11 на трубопроводе сжатого воздуха.

Осуществляется заполнение всей системы сжатым воздухом до давления, равного 0,12 МПа. Значение давления сжатого воздуха поддерживается с помощью регулятора давления 18 и измеряется манометром 17. После заполнения сжатым воздухом системы включается в работу система автоматического управления амплитудой возмущений уровня жидкости в барботажной трубке пузырьковой камеры и включается счетчик 14 числа пузырьков сжатого воздуха в жидкости пузырьковой камеры 16.

Одновременно с включением счетчика 14 срабатывает электронное реле времени, которое настроено на время испытаний на герметичность, равное 60 с, и после истечения этого времени отключает счетчик. По числу импульсов по счетчику 14 делают заключение о герметичности теплообменника. В дальнейшем теплообменник 2 отсоединяют от блока испытаний на герметичность и цикл испытаний повторяется со следующим теплообменником. Автоматизированная линия периодического действия (а не непрерывного действия, которая представлена на рисунке 10.1) испытаний на герметичность автотракторных теплообменников с использованием устройства с пузырьковой камерой и эталонной емкостью разработана применительно к существующим в ПО «Радиатор» постам испытаний на герметичность теплообменников. Схема этой линии приведена на рисунке 10.3. В данной автоматизированной линии используются резервуар 1 с водой, поддон 2, пневматический подъемник 11, эталонная емкость 13 и блок 9 испытаний теплообменников на герметичность.



Рисунок 10.3 - Схема автоматизированной линии периодического действия испытаний на герметичность автотракторных теплообменников с использованием устройства с пузырьковой камерой

На поддон 2 устанавливается испытываемый на герметичность теплообменник 3 и соединяется с блоком 9 испытаний на герметичность трубопроводом 21. Защитный экран 10 установлен между эталонной емкостью 13 и блоком 9 испытаний на герметичность. На передней панели блока 9 испытаний на герметичность расположены переключатели 4 и 6, световые табло 7 и 8, пузырьковая камера 15 с барботажной трубкой 16, регулятор давления 18, манометр 17 и счетчик 14 числа пузырьков, выходящих из барботажной трубки 16 в жидкость пузырьковой камеры.

Испытания теплообменника 3 на герметичность осуществляется в той же последовательности, что и при испытании теплообменников на технологической линии, приведенной на рисунке 10.1. Однако, при испытании теплообменников на технологической линии, приведенной на рисунке 10.1, после испытаний теплообменника осуществляется фактически только разбраковка теплообменников на герметичные и негерметичные. Негерметичные теплообменники с поста испытаний отправляются на пост устранения неисправностей. При испытании теплообменников на автоматизированной линии, схема которой приведена на рисунке 10.3, негерметичный теплообменник с помощью пневмоцилиндра 11 погружается в резервуар 1 с водой и визуально определяют микротечи. После этого теплообменник извлекается из резервуара с водой, устраняются микротечи и испытания на герметичность теплообменника повторяются.

### 10.2 Автоматизированные линии испытаний на герметичность автотракторных теплообменников с использованием перегретого водяного пара и датчика обобщенного или локального обнаружения пара в воздухе

На рисунке 10.4 приведена схема автоматизированной линии испытаний на герметичность теплообменников с использованием перегретого пара и датчика обобщенного обнаружения пара в воздухе вокруг теплообменника.

В автоматизированной линии испытаний на герметичность теплообменников (рисунок 10.4) содержится конвейер 1, датчик обобщенного обнаружения водяного пара 4 в воздухе, окружающем теплообменник, пневмоцилиндр 7 и блок испытаний на герметичность 11.

В блоке испытаний на герметичность 11 установлены регулятор давления 19 и манометр 14 перегретого пара, переключатель 18 и кнопка управления 16, показывающий прибор 10, сигнальная лампа 12 и пневмораспределитель 15. Кнопка 16 предназначена для включения электрического питания блока 11. Переключатель 18 используется для дистанционного перемещения датчика 4 в верхнее или нижнее положение с помощью пневмоцилиндра 7 и пневматического распределителя 15.

Регулятором давления 19, наблюдая по манометру 14, устанавливают необходимое давление перегретого пара, подводимого внутрь теплообменника при испытаниях на герметичность. По показывающему прибору 10 и сигнальной лампе 12 делают заключение о герметичности теплообменника. Вентиль 20 предназначен для дросселирования перегретого пара из теплообменника 2 в атмосферу перед испытаниями на герметичность для прогрева и удаления влаги с поверхностей теплообменника.



Рисунок 10.4 – Схема автоматизированной линии испытаний на герметичность автотракторных теплообменников с использованием перегретого пара и датчика обобщенного обнаружения пара в воздухе

Испытание на герметичность осуществляется в следующей последовательности. Подается конвейером 1 на пост испытаний теплообменник 2. Теплообменник с помощью трубопровода 3 присоединяется к блоку 11 испытаний и по паропроводу 17 подается перегретый пар в блок 11. Включается электрическая схема блока 11, а затем регулятором давления 19 устанавливается давление перегретого пара, равное 0,12 МПа (контроль давления пара осуществляется по манометру 14).

Открывается частично дроссель 20 и дросселируется перегретый пар в конденсатор пара. Перегретый пар при этом проходит от паровой магистрали 17 через регулятор давления 19, паропровод 3, теплообменник 2, дроссель 20 и сигнализирующий прибор температуры с регулируемой настройкой пределов сигнализации.

К выходу прибора температуры присоединены две сигнальные лампы 12, расположенные в верхней части блока 11. С помощью задающего устройства сигнализатора температуры устанавливаются допустимые пределы температуры перегретого пара, выходящего из теплообменника 2 в конденсатор пара. По сигнальным лампам температуры перегретого пара судят о температуре поверхностей теплообменника. После прогрева поверхностей теплообменника до заданной температуры закрывается вентиль 20 и опускается датчик 4 обнаружения перегретого пара в воздухе, окружающем теплообменник, в нижнее положение. В верхней части датчика 4 установлен измерительный преобразователь 5 перегретого пара. При наличии пара внутри датчика 4, выходящего через микрощели теплообменника, загорается лампа 12, а по показывающему прибору 10 делают выводы о степени герметичности теплообменника.

После окончания испытаний на герметичность теплообменника 2 поднимается датчик 4 в верхнее положение с помощью пневмоцилиндра 7. При поднятии датчика 4 в верхнее положение автоматически включается электродвигатель 9 вентилятора 5, который обеспечивает полное удаление пара из камеры датчика 4 в атмосферу.

После восстановления исходного значения показывающего прибора и погасания сигнальной лампы 12 электродвигатель 9 вентилятора 8 выключается и датчик 4 готов к использованию при испытаниях на герметичность последующего теплообменника.

Схема автоматизированной линии испытаний на герметичность автотракторных теплообменников с использованием перегретого пара и датчика локального обнаружения пара в воздухе приведена на рисунке 10.5.

В автоматизированную линию входят конвейер 1, теплообменник 2, блок 8 испытаний на герметичность теплообменников, блок удаления влаги 15 с поверхности измерительного преобразователя и датчик 14 локального обнаружения водяного пара в воздухе. На блоке 8 испытаний на герметичность установлены регулятор 7 давления перегретого пара и манометр 6, электрические переключатели 9 и 13, сигнальная лампа 10 для сигнализации отклонения температуры перегретого пара от установленных значений, показывающий прибор 12 и сигнальная лампа 11, предназначенные для показания и сигнализации наличия пара в воздухе вокруг теплообменника. Блок удаления влаги 15 с поверхности датчика содержит электрический нагреватель 16 и вентилятор 17.

Испытания на герметичность теплообменников на автоматизированной линии, схема которой приведена на рисунке 10.5, проводятся в следующей последовательности. Испытываемый на герметичность теплообменник с помощью паропроводов присоединяется к блоку 8. Включаются электрический нагреватель 16 и вентилятор 17. Подается перегретый пар к теплообменнику 2. Включается в работу регулятор давления 7, который поддерживает давление перегретого пара в теплообменнике, равное испытательному давлению.



Рисунок 10.5 - Схема автоматизированной линии испытаний на герметичность автотракторных теплообменников с использованием перегретого водяного пара и датчика локального обнаружения пара в воздухе

Медленно открывается дроссель 3 и дросселируется часть перегретого пара из теплообменника в конденсатор пара по трубопроводам 4 и 5 до тех пор, пока не погаснет сигнальная лампа 10, указывающая на то, что температура поверхностей теплообменника достигла установленного значения.

Закрывается дроссель 3 и датчик 14 перемещается над поверхностью теплообменника со скоростью, не превышающей 15-20 мм за одну секунду. При наличии микрощелей в теплообменнике и обнаружении пара в воздухе вокруг него загорается сигнальная лампа 11 и включается электрический звонок. По прибору 12 оценивают величину микротечи. После испытаниях теплообменника на герметичность датчик 14 устанавливается на блок 15 и с поверхности датчика удаляется влага. По сигнальной лампы 11 и показаниям прибора устанавливают готовность датчика 14 к повторным измерениям.

### 10.3 Автоматизация акустического деаэратора для дегазации пробной жидкости

Пробная жидкость, которая используется при испытаниях на герметичность изделий, например, железнодорожных цистерн, должна проходить устройства дегазации для удаления пузырьков воздуха или других

газов. На рисунке 10.6 приведена упрощенная функциональная схема автоматизации дегазации воды с использованием акустического деаэратора. С помощью подсистемы автоматического регулирования 1 поддерживается расход пробной жидкости, поступающей в издели. Расход жидкости измеряется камерной диафрагмы 1а типа ДК с использованием преобразователя 1б типа «Метран».

Аналоговый сигнал от преобразователя 16 с помощью программно аппаратных средств 1в ограничивается по максимуму, усиливается в *к* раз и преобразуется в цифровой код. Программно аппаратные средства 1г обеспечивают отработку управляющих воздействий по ПИ закону и выдачу их на исполнительный механизм 1ж с регулирующим клапаном 1к.

Подсистемой 2 обеспечивается контроль и регулирование уровня пробной жидкости в акустическом деаэраторе 1. Подсистемы 3 и 5 осуществляют контроль и управление по содержанию газов в пробной жидкости, изменяя частоту ультразвуковых колебаний генератора. С помощью подсистемы 4 осуществляется контроль частоты ультразвуковых колебаний и вводится сигнал по частоте в подсистему управления 3.

Регулирование газосодержания пробной жидкости производится подсистемами 3, 4 и 5. Количество газа в воде измеряется кислородомерами типа РЭК-130, которые установлены до акустического деаэратора (позиция 3а) и после него (позиция 5а). Кислородомеры РЭУ-130 являются показывающими приборами, устанавливаются по месту и имеют электрический аналоговый выход.

Электрические сигналы от кислородомеров и датчика ультразвуковой частоты 4a с преобразователем 4б поступают в УВМ. От нее управляющие сигналы поступают на исполнительный механизм ультразвукового генератора, который изменяет частоту колебаний в пределах от 18 до 22 кГц.

### 10.4 Испытания на герметичность железнодорожных цистерн

Железнодорожные цистерны, используемые, например, для перевозки углеводородного сырья испытывают на герметичность водой.

#### Рисунок 10.6

На рисунке 10.7 приведена принципиальная схема одного из вариантов устройства для испытаний на герметичность железнодорожных цистерн, кото-

рая разработана применительно к Управлению железнодорожными перевозками АО «Газпрома» г. Оренбурга. Устройство содержит мерный цилиндр 1, силовой цилиндр 2 со штоком 3, на котором установлена зубчатая рейка 4. С рейкой 4 взаимодействует шестерня 5, закреплённая на валу 6. Измерительное устройство содержит мерный цилиндр 1 с поршневым приводом 7 для перемещения плунжера 8 и стрелки 9, закреплённой на плунжере 8, конечный выключатель 10 и шкалу 11.

Силовой цилиндр 2 имеет механизм зажима, выполненный в виде установленных на валу 6 эксцентриков 12 и 13 и взаимодействующих с ними через толкатели 14 и 15 клиновых зажимов 16 и 17. Устройство снабжено гидроприводом 18. Испытываемое изделие 19 подсоединяется к гидравлической камере 20, на которой установлены сильфоны с фланцами 21 и 22. В сильфон с фланцем 21 входит шток 3 силового цилиндра 2, а в сильфон с фланцем 22 входит плунжер 8 мерного цилиндра 1.

Гидросистема питания устройства содержит насосную станцию 24, клапаны 25, 26 и 27, гидрораспределители 28-31, обратный клапан 32, кран 33 и электроконтактный манометр 23.

Устройство работает следующим образом. Жидкость от насосной станции 24 подаётся в камеру 20 и испытываемое изделие 19 через клапан 25, гидрораспределитель 28, обратный клапан 32 и открытый клапан 33.

После заполнения испытываемого изделия водой включается через клапан 26 и распределитель 29 силовой цилиндр 2, шток 3 которого повышает в ней давление. Через клапан 27 и гидрораспределитель 31 включается поршневой привод 7 мерного цилиндра 1. При наличии течи в испытываемом изделии 19 плунжер 8 совместно с дном сильфона 22 перемещается вместе со стрелкой 9 относительно шкалы 11. По величине перемещения стрелки за время испытания определяют значение утечек пробной жидкости и делают заключение о герметичности цистерны.

# 10.5 Мероприятия по применению микропроцессорных устройств управления при автоматизации испытаний изделий на герметичность

Вопросы проектирования микропроцессорных систем автоматизации и управления испытаниями на герметичность изделий с функциональными и принципиальными электрическими схемами подробно изложены в учебных пособиях [1, 2]. На рисунке 10.8 приведены основные модули микропроцессорных устройств, которые рекомендуются к использованию при разработке конструкторской документации по автоматизированным системам испытаний на герметичность изделий.



Рисунок 10.7 – Схема устройства испытаний на герметичность железно дорожных цистерн

## Микропроцессорные устройства автоматизации испытаний изделий на герметичность

Модули электрических и электронных устройств, на основе которых создаются микропроцессорные системы управления испытаниями

Модуль ограничения аналоговых сигналов по максимуму

Модуль выбора необходимой чувствительности измерительных преобразователей

Модуль ввода в микропроцессорную систему управления сигналов от дискретных датчиков

Устройство адресации и обмена данными в микропроцессорной системе

Буферы шины адреса

Буферы шины данных

Регистр слова состояния и регистр данных, выводимых на сегменты индикаторов

Элементы прямого доступа к памяти и вывода информации на дисплей

Модуль преобразования аналоговых сигналов от датчиков в цифровые коды и ввода их в микропроцессорную систему управления Схемы формирования и прохождения основных сигналов управления в микропроцессорной системе Схемы компоновки модулей в блоки микропроцессорной системы управления

Запись данных в память (ОЗУ) или внешнее устройство (ВУ

Формирование сигнала удлиненный DBIN

Формирование сигналов CS и SEL управления буферами шины данных

Синхронизация работы микропроцессора и регистра слова состояния и формирование строба слова состояния

Формирование сигналов I/OR (чтение ВУ) и MEMR (чтение ОЗУ и ПЗУ)

Формирование сигнала готовность (RDY)

Формирование сигналов прерывания в микропроцессорной системе управления

Модуль усиления и фильтрации аналоговых сигналов

Модуль формирования инициативных сигналов от аналоговых датчиков

Дешифратор адреса первой ступени

Дешифраторы адреса второй ступени для ПЗУ и ОЗУ

Блоки нормализации сигналов латчиков и ввода систему ИХ В управления, блоки прямого доступа к памяти и вывода информации на дисплей и цифропечать, микропроблок блоки цессора. вывода сигналов на реверсивные и нереверсивные электрические ИМ, электромагнитные приводы и другие

Рисунок 10.8 - Микропроцессорные устройства автоматизации испытаний на герметичность изделий

Общим алгоритмом ввода данных в микропроцессорную систему управления технологическими процессами от измерительных преобразователей обычно предусматривается ввод информации от конкретного измерительного преобразователя в определенное для системы управления время, проверку введенных данных на достоверность и необходимость проведения линеаризации данных, проведение линейного или нелинейного масштабирования, проверку на наличие фильтрации и проведение при необходимости фильтрации входных сигналов и проверку вводимых сигналов на допустимые пределы для подсистем предупредительной и аварийной сигнализации или формирования инициативных сигналов на контроллер прерывания системы управления.

В условия производства используются различные способы организации сбора информации от измерительных преобразователей, ввода их в микропроцессорную систему и вывода управляющих сигналов на исполнительные механизмы. При автоматизации процессов испытаний на герметичность изделий, когда только разрабатываются системы управления и контроля и не известны многие технико-экономические показатели проектируемого объекта автоматического управления, может быть положено время переходного процесса  $t_n$  для каждой подсистемы автоматического регулирования. Если технологический параметр только контролируется, а не регулируется, тогда принимается для этой подсистемы контроля условное время переходного процесса  $t_{pv}$ , обозначаемое как и для обычной подсистемы автоматического регулирования через  $t_p$ . Время переходного процесса для любой подсистемы автоматического управления может быть определено экспериментально на объекте управления или теоретически по переходной характеристике. Время переходного процесса подсистемы автоматического управления зависит, в основном, от типа технологического параметра (давление, температура, уровень, расход среды), от объекта управления, от его массы, объема, энергоемкости, геометрических размеров, от среды, находящейся в объекте управления.

Переходные характеристики большинства промышленных объектов могут быть объединены в пять групп по времени переходного процесса  $t_p$ , а именно: до 2, 5, 10, 30 и 90 с. Эти временные характеристики переходных процессов объектов управления приведены в первой колонке таблицы 10.1. Во второй колонке таблицы даны обобщенные характеристики объектов управления по функциональным и динамическим признакам применительно к группам подсистем автоматического управления.

Группы подсистем автоматического управления имеют обозначения 1У, 2У, 3У, 4У и 5У и приведены в четвертой колонке таблицы 10.1. Согласно пяти группам подсистем автоматического управления выделены пять групп подсистем автоматизированного контроля: 1К, 2К, 3К, 4К и 5К (третья колонка таблицы 10.1).

Интервалы времени между очередным обслуживанием исполнительных механизмов систем управления принимаются для каждой группы 1У - 5У равными  $t_p/5$ . Эти расчетные интервалы времени обслуживания исполнительных механизмов приведены в шестой колонке таблицы 10.1 и имеют следующие значения: 0,4; 1,0; 2,0; 6,0 и 18 с. Для того чтобы в микропроцессорной системе

управления своевременно обновлялась информация от измерительных преобразователей, принимается обслуживание измерительных преобразователей проводить с частотой в два раза большей, чем частота выдачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы. Поэтому расчетные интервалы обслуживания измерительных преобразователей определены как t<sub>p</sub>/10, представлены в пятой колонке таблицы 10.1 и принимают значения равные 0,2; 0,5; 1,0; 3,0 и 9,0 с.

В рекомендуемой для систем испытаний на герметичность изделий микропроцессорной системе предусматривается использование контроллеров прерывания, которыми устанавливают приоритеты для обслуживаемых подсистем автоматического регулирования и подсистем автоматизированного контроля. Чтобы (в условиях возможного) уменьшить очередь сигналов, поступающих от таймеров и других инициативных датчиков на контроллеры прерывания и требующих обслуживания, устанавливаются принятые интервалы времени для обслуживания измерительных преобразователей и исполнительных механизмов. Интервалы времени, принятые для обслуживания измерительных преобразователей и исполнительных механизмов, приведены в колонках 7 и 8 и имеют следующие значения для датчиков: 0,2; 0,5; 1,05; 2,96 и 9,0 с и для исполнительных механизмов: 0,36; 0,96; 2,16; 5,96 и 17,5 с.

В последней колонке таблицы 10.1 приведены десятичные числа, которые необходимо вводить в регистры таймеров, чтобы получить необходимые интервалы времени для обслуживания измерительных преобразователей микропроцессорной системы управления.

В микропроцессорных системах управление исполнительными механизмами, установленными на объекте управления, производится чаще всего с использованием широтно-импульсных сигналов. Имеются различные способы формирования широтно-импульсных сигналов, например, с использованием программируемых циклов, включенных в основную программу системы автоматизации. Однако, такой способ нерационально загружает центральный микропроцессор. В рассматриваемой микропроцессорной системе управления формирование широтно-импульсных сигналов производится с помощью программируемых таймеров, которые настраиваются на временные интервалы 1К -5К и 1У - 5У. Например, для цикла 5У (продолжительность 17,5 с) можно сформировать широтно - импульсный сигнал с H - уровнем, равным 1К (0,2 с); 2К (0,5 с); 3К (1,05 с); 4К (2,96 с) и 5К (9,0 с).

Таблица 10.1

### 10.6 Алгоритм автоматизации процессов испытаний изделий на герметичность

Схема алгоритма автоматизации процессов испытаний изделий на герметичность приведена на рисунке 10.8.

Начало разработки документации по автоматизации процессов испытаний на герметичность изделий

1 Установить наиболее применяемые методы и способы их реализации при испытаниях на герметичность изделий

2 Установить наиболее распространенные типы негерметичности для заданной номенклатуры изделий и причины возникновения их при изготовлении на предприятии

3 Установить наиболее распространенные типы негерметичности для заданной номенклатуры изделий и исследовать причины возникновения их в условиях эксплуатации изделий

Т

| 4 Разрабатывать отдельно ав-<br>томатизированные системы для <u>н</u><br>испытаний изделий на герметич-<br>ность и отдельно для обнаруже-<br>ния расположения микротечей?                        | 5 Разработать общую автомати-<br>зированную систему для испыта-<br>ний изделий на герметичность и<br>для обнаружения расположения<br>микротечей           Да   |
|--|--|
| 6 Составить требуемые для вы-<br>бора характеристики методов и<br>средств испытаний на герметич-<br>ность (например, по ГОСТ<br>Р51780-2001) с учетом имеющих-<br>ся методов и средств испытаний | 7 Использовать критерии выбора мето-<br>дов и средств испытаний, например, по<br>ГОСТ Р51780-2001: выполнение обяза-<br>тельных и дополнительных требований,<br>затраты – качество (стоимость –<br>эффективность), повышение культуры<br>производства, согласование с заказчиком |
|  |  |

8 Составить перечень обязательных и дополнительных требований к заданным показателям испытаний (например, по ГОСТ Р51780-2001) для проектируемой автоматизированной системы испытаний изделий на герметичность 9 Составить перечень обязательных и дополнительных требований к заданным показателям испытаний (например, по ГОСТ Р51780-2001) для проектируемой автоматизированной системы обнаружения расположения микротечей

10 Выполнить по И пункты 8 и 9

11 Выбрать необходимый метод и средства испытаний на герметичность изделий

Рисунок 10.8



12.3.1.4 Выбрать геометрические размеры измерительного устройства и его составных частей, вспомогательных устройств: эталонных емкостей, трубопроводов. (Например, определить геометрические размеры эталонной емкости в зависимости от объема изделия, испытываемого на герметичность)

13 Выполнить мероприятия по совершенствованию математического описания объектов управления при создании автоматизированных систем испытаний:

13.1 Установить типовые объекты автоматического управления систем испытаний на герметичность изделий, их существующее математическое описание и основные управляемые параметры.

13.2 Разработать математическое описание объектов управления систем испытаний по основным управляемым параметрам с учетом максимального количества влияющих величин и применимого (этого математического описания) для различных конструктивных исполнений объектов управления 13.2.1 Оценить на стадии проектирования динамические свойства объекта автоматического управления по параметрам, входящим в коэффициенты дифференциальных уравнений

13.2.2 Определить экстремальные соотношения параметров объекта управления по выражениям для коэффициентов дифференциальных уравнений

13.2.3 Определить параметры настройки микропроцессорной системы управления испытаниями, используя дифференциальные уравнения и их коэффициенты

13.3 Разработать метод организации ввода информации в микропроцессорную систему от измерительных преобразователей и вывода управляющих сигналов на исполнительные механизмы

14 Выполнить мероприятия по разработке дегазации пробной жидкости при создании автоматизированных систем испытаний, а именно:

14.1 Разработать и исследовать устройства дегазации пробной жидкости при испытаниях на герметичность изделий

14.1.1 Разработать и исследовать устройства дегазации пробной жидкости при наличии в жидкости значительного количества пузырьков

14.1.2 Разработать и исследовать устройства дегазации пробной жидкости при наличии в жидкости, в основном, растворенного газа

15 Выполнить мероприятия по повышению ресурса герметичности изделий при создании автоматизированных систем испытаний на герметичность, а именно: 15.1 Статистические ис-15.1.1 Выявить влияние технологичеследования негерметичности ских процессов производства на гермеизделий при производстве тичность изделий 15.2.1 Установить статистические значе-15.2 Статистические исния негерметичности изделий, изменеследования негерметичности ние конструктивных параметров сопряизделий, поступающих в режений и деталей, изменение динамичемонт или при технических ских характеристик освидетельствованиях в условиях эксплуатации 15.3.1 Исследовать герметичность перепускных клапанов в режимах переключения и предохранения 15.3 Установить и исследовать влияние условий эксплуатации на герметичность 15.3.2 Исследовать герметичность преизделий (в реальных или лаклапанов в режимах бораторных условиях), надохранительных предохранения автоколебательном пример, клапанных уст-И (режиме треска) ройств 15.4 Усовершенствовать 15.3.3 Исследовать гидроэрозионную конструкцию изделия на осстойкость деталей сопряжений клапаннове проведенных исследоседло предохранительных и перепускваний, например, клапанных ных клапанов устройств 15.5 Исследовать динами-15.4.1 Формировать концентрические ческие характеристики усофаски седел вершенствованной конструкции (например, превышение давлений в нагнета-15.4.2 Разработать конструкции, предоттельных и сливных трубовращающие изгиб пружины клапана проводах)

 16 Выполнить мероприятия по применению микропроцессорных устройств управления при создании автоматизированных систем испытаний, а именно:

 16.1 Разработать методику организации
 16.2 Разработать методику

ввода информации от измерительных преобразователей в микропроцессорную систему и вывода управляющих сигналов на исполнительные механизмы систем автоматизации испытаний на герметичность изделий 16.2 Разработать методику формирования широтноимпульсных сигналов различной длительности и длительности фазы высокого уровня систем автоматизации испытаний

16.3 Сформировать схемы основных модулей, блоков и схем прохождения сигналов управления в микропроцессорной системе автоматизации, например:

16.3.1 Модулей микропроцессорных систем управления: модуля ограничения аналоговых сигналов по максимуму и выбора необходимой чувствительности измерительных преобразователей, модуля ввода в микропроцессорную систему управления сигналов от дискретных датчиков, устройства адресации и обмена данными в микропроцессорной системе, элементов прямого доступа к памяти и вывода информации на дисплей, модуля преобразования аналоговых сигналов датчиков в цифровые коды и от ввода их в микропроцессорную систему, модуля усиления и фильтрации аналоговых сигналов, буферы шины адреса и шины данных, модуля формирования инициативных сигналов от аналоговых датчиков, дешифратор адреса первой ступени и второй ступени для ПЗУ и ОЗУ

16.3.2 Схем формирования сигналов управления в микропроцессорной системе: формирования сигналов удлиненный DBIN. СS и SEL управления буферами шин данных, синхронизации работы микропроцессора и регистра слова состояния и формирования строба слова состояния, формирования сигналов I/OR. MEMR. RDY. сигналов прерывания и записи данных в память устили внешнее ройство

16.3.3 Схем компоновки модулей в блоки микропроцессорной системы управления: блока нормализации сигналов от датчиков и ввода их в систему управления, блоков прямого доступа к памяти и вывода информации на дисплей и цифропечать, блока микропроцессора, блока вывода сигналов на реверсивные и нереверсивные электрические ИМ, электромагнитные приводы и другие

17 Методы, способы и алгоритмы проектирования общетехнических систем автоматизации и управления технологическими процессами и производствами

18 Автоматизированная система испытаний на герметичность полых изделий, в которую входят также подсистемы автоматизации подготовки установки (линии) к испытаниям на герметичность изделий, перехода к следующему циклу испытаний, плановой и аварийной остановки установки. Конец

### Основные результаты и выводы работы

Общим результатом исследований, изложенных в учебном пособии, является решение научно-технической проблемы повышения эффективности испытаний изделий на герметичность, включающее теоретический анализ и совершенствование методов испытаний, способов их реализации и устройств применительно к автоматизации процессов испытаний, разработку общих структур и принципиальных схем типовых вариантов систем автоматизированного контроля герметичности изделий по утечкам пробной среды и систем автоматического управления, обеспечивающих автоматизированный контроль, а также основы повышение ресурса герметичности элементов систем управления испытаниями изделий.

1 Испытания на герметичность основной массы изготавливаемых и ремонтируемых изделий (до 70 %) на промышленных предприятиях проводятся манометрическим, пузырьковым или гидростатическим методом.

2 Предложены принципы создания автоматизированных систем управления технологическими процессами испытаний изделий на герметичность: принцип автоматизированного контроля герметичности изделий при периодических возмущениях контролируемого (управляемого) или взаимосвязанного с ним параметра в устройстве испытаний; принцип управления по отклонению параметра при специально генерируемыми в объекте управления или другом устройстве периодическими возмущениями по управляемому; принцип соответствия точности автоматизированных систем испытаний на герметичность классам герметичности изделий; принцип контроля герметичности изделия при постоянном испытательном давлении; принцип неразделимости испытаний изделий на герметичность и повышения ресурса герметичности изделий и другие.

3 На основании предложенных принципов автоматизации технологических процессов испытаний изделий на герметичность усовершенствованы способы и устройства применительно к автоматизации процессов испытаний: контроль герметичности изделий, испытываемых на герметичность жидкостью, по количеству и объему пузырьков сжатого воздуха в пузырьковой камере; использование гидравлических затворов взамен обычных запорных органов; применение упругой емкости, заполненной газом, в качестве составной части эталонной емкости, заполненной жидкостью, при испытаниях изделий жидкостью; повышение значений измеряемых разностей давлений при контроле герметичности путем сжатия выделенных объемов газовой среды в устройстве испытаний и другие.

4 Проведено структурирование процессов и устройств систем испытаний применительно к автоматизированным системам управления испытаниями изделий на герметичность, системам автоматизированного контроля герметичности изделий и системам автоматического управления (САУ), которые разделены на САУ, непосредственно обеспечивающие автоматизированный контроль герметичности изделий и взаимосвязанные общими устройствами и процессами с системами контроля, и САУ подготовительно-заключительных операций
испытаний изделий и вспомогательных механизмов и устройств. К системам автоматизированного контроля герметичности изделий отнесены системы автоматического измерения контролируемых параметров и разработанные системы автоматического управления, которые непосредственно обеспечивают автоматизированный контроль герметичности. На основании такого деления систем автоматизации разработаны основы теории процессов и устройств контроля герметичности и систем автоматического управления, а также основы теории повышения ресурса герметичности клапанных устройств систем управления.

5 Устройства автоматизированного контроля герметичности изделий пузырьковым, манометрическим и гидростатическим методами представлены в виде математических моделей, которые позволили: а) существенно понизить оценочный по мощности порог чувствительности устройств; б) выявить взаимосвязи между параметрами устройств для испытаний и временем выполнения основных и вспомогательных операций; в) идентифицировать системы "измерительное устройство-изделие" как типовые динамические звенья в зависимости от степени герметичности изделия; г) установить соотношения для оценки статических и динамических погрешностей измерения утечек пробной среды из изделия д) оценить влияние дросселирования части пробного газа из изделия в атмосферу перед непосредственным контролем герметичности изделия; е) установить зависимости между объемом испытываемого изделия, объемом эталонной емкости и погрешностью испытаний. Это позволяет обоснованно выбирать конструктивные и технологические параметры при разработке систем автоматизированного контроля герметичности изделий по утечкам пробной среды в зависимости от требований к изделию по герметичности.

Выявлены и разрешены противоречия между технологическими процессами испытаний и требованиями систем автоматического управления такие, например, как: при контроле герметичных или с малыми допустимыми утечками пробной среды изделий время переходного процесса для систем управления стремится к бесконечности; в системах контроля и управления при испытаниях изделий на герметичность имеются нелинейности типа «сухое трение», значения параметров которых при контроле герметичных изделий выше полезных сигналов. Для устранения этих и других противоречий разработан метод автоматизированного контроля герметичности при периодических возмущениях контролируемого (управляемого) или взаимосвязанного с ним параметра.

6 Типовые процессы и устройства систем испытаний представлены как модели объектов автоматического управления. Выполнено математическое моделирование объектов управления, в которые поступают две фазы среды в одном потоке -жидкость и газ (воздух, углеводородные газы) или взаимодействуют две фазы среды в объекте-водяной пар и жидкость. Полученные дифференциальные уравнения позволяют на стадии проектирования проводить оценку динамических свойств объектов управления, а также осуществлять автоматическое управление процессами испытаний по вычисляемым параметрам с использованием управляющей ЭВМ. Разработанные математические модели газожидкостных объектов управления апробированы при автоматизации технологических процессов испытаний изделий на герметичность и при автоматизации различных непрерывных химико-технологических процессов производства.

7 Предложены и исследованы методы и их математические обоснования, направленные на повышение ресурса герметичности и качества работы элементов автоматизированных систем испытаний на примерах гидравлических затворов, регулирующих и предохранительных клапанных устройств. Проведено математическое моделирование распределения давления в сопряжениях клапан –седло в зависимости от приложенного перепада давления, геометрической формы деталей сопряжения и скорости возвратно-поступательного перемещения клапана относительно седла, а также моделирование работы предохранительных клапанов непрямого действия с присоединенной упругой емкостью.

8 На основе предложенных принципов автоматизированного контроля герметичности изделий с использованием периодических возмущений и математических моделей разработаны новые структуры автоматизированных систем испытаний с автоматизированным контролем герметичности изделий по утечкам пробной среды. Рассмотрены примеры синтеза и реализации дискретных систем автоматического управления с ПИ и ПИД регуляторами, которые обеспечивают автоматизированный контроль герметичности изделий по утечкам пробной среды.

9 Способы реализации методов испытаний изделий на герметичность и конструкции оборудования, средства автоматизации и методы проведения исследований, организация испытаний и структуры построения систем автоматизированного контроля герметичности изделий по утечкам пробной среды из изделий с системами автоматического управления, непосредственно обеспечивающими контроль герметичности, примеры принципиальных схем систем автоматизированного контроля герметичности и примеры синтеза и реализации дискретных систем автоматического управления, работающими в промежутках между возмущениями, представляют собой теоретическую и практическую основу создания и совершенствования автоматизированных систем испытаний на герметичность изделий.



Рисунок 10.6 – Схема автоматизации акустического деаэратора дегазации жидкости



Рисунок 10.2

|                             | Характеристика объекта управления             | Обозначение |        | Расчетные |      | Принятые  |      | Чис-  |
|-----------------------------|---|-------------|--------|-----------|------|-----------|------|-------|
|                             |   | подгруппы   |        | интервалы |      | интервалы |      | ло,   |
|                             |   |             |        | между об- |      | обслужи-  |      | вводи |
| Время<br>t <sub>p</sub> , c |   |             |        | служива-  |      | вания     |      | мое в |
|                             |   |             |        | нием      |      |           |      | тай-  |
|                             |   | Сбора       | Вывода | Датч      | ИМ,  | Датч      | ИМ,  | мер   |
|                             |   | инфор-      | сигна- | И-        | c    | И-        | c    |       |
|                             |   | мации       | лов на | ков,      |      | ков,      |      |       |
|                             |   |             | ИМ     | c         |      | c         |      |       |
| До 2                        | Астатические объекты малого объема для сис-   | 1K          |        | 0,2       |      | 0,2       |      | 10    |
|                             | тем давления (разрежения)                     |             | 1У     |           | 0,4  |           | 0,36 | 18    |
| До 5                        | Астатические объекты большого объема для      | 2К          |        | 0,5       |      | 0,5       |      | 25    |
|                             | систем давления (разрежения), расхода         |             | 2У     |           | 1,0  |           | 0,96 | 48    |
| До 10                       | Астатические объекты уровня, статические объ- | 3К          |        | 1,0       |      | 1,05      |      | 53    |
|                             | екты расхода                                  |             | 3У     |           | 2,0  |           | 2,16 | 108   |
| До 30                       | Объекты с медленно изменяющимися уровнями     | 4К          |        | 3,0       |      | 2,96      |      | 148   |
|                             | и быстро изменяющимися температурами среды    |             | 4У     |           | 6,0  |           | 5,96 | 286   |
| До 90                       | Объекты с системами управления температурой,  | 5К          |        | 9,0       |      | 9,0       |      | 450   |
|                             | физико-химическими свойствами среды (СО, О2,  |             | 5У     |           | 18,0 |           | 17,5 | 875   |
|                             | pH)   |             |        |           |      |           |      |       |

Таблица 10.1 - Организация ввода информации от измерительных преобразователей и вывода управляющих сигналов на исполнительные механизмы

## Список использованных источников

1 Жежера, Н.И. Микропроцессорные системы автоматизации и управления [Текст]: учеб. пособие / Н.И. Жежера; М-во общ. и проф. образования РФ. Оребург. гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 1999. – 64 с. –Библиогр.: с. 64. – 100 экз. – ISBN 5-7410-0589-6. (в пер.).

2 Жежера, Н.И. Микропроцессорные системы автоматизации и управления [Текст]: учеб. пособие / Н.И. Жежера; М-во образования РФ. Оребург. гос. ун-т. – Изд. 2-е перераб. и доп. – Оренбург: ОГУ, 2001. – 81 с. –Библиогр.: с. 81. – 100 экз. – ISBN 5-7410-0669-8. (в пер.).

3 ГОСТ 356-80. Арматура и детали трубопроводов. Давления условные, пробные и рабочие. Ряды [Текст]. – Введ. 1981-01-01. -М.: Изд-во стандартов, 1987.–36 с.

4 Котелевский, Ю.М. Современные конструкции трубопроводной арматуры для нефти и газа [Текст]: справочное пособие / Ю.М. Котелевский. – Изд. 2-е перераб. и доп. -М.: Недра, 1976. -496 с. – Библиогр.: с. 490- 493.- 13000 экз. (в пер.).

5 ГОСТ 24054-80. Изделия машиностроения и приборостроения. Методы испытаний на герметичность. Общие требования [Текст]. - Введ. 1981-01-01. - М.: Изд-во стандартов, 1987. -18 с.

6 **ГОСТ 9544 –93.** Арматура трубопроводная запорная. Нормы герметичности затворов [Текст]. - Введ. 1995-01-01. -М.: Изд-во стандартов, 1995. - 4 с.

7 А.с. 485335 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01M 1/08. Способ установки датчиков инерционного типа дли измерения вибрации вала [Текст] / М.Д. Генкин, А.А. Гусаров, В.К. Кринкевич, Ю.Б. Железков (СССР). - №1472610/25-28; заявл. 18.09.70; опубл. 25.09.75. Бюл. № 13. –3 с.

8 А.с.748158 СССР, МКИ<sup>2</sup> G01M 3/26. Устройство для определения суммарных утечек газа из изделия [Текст] /А.С. Зажигин, А.Ф. Зайцев, В.А. Тюрин, Г. Т. Лебедев (СССР). -№2679349/25-28; ззаявл. 30.10.78; опубл. 15.08.80. Бюл.№26. –2 с.

9 А.с. 365610 СССР, МКИ G01М 3/26. Установка для определения суммарных утечек из емкостей и замкнутых систем [Текст] / А.С. Зажигин, А.Ф. Зайцев, В.М. Сапожников, В.А. Тюрин, В.А. Сердоков, Е.С. Остренок, Г.С. Луговский (СССР). -№ 1604404/25-28; заявл. 14.12.70; опубл. 8.01.73. Бюл. № 6. – 2 с.

10 А.с. 485335 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01М 1/08. Способ установки датчиков инерционного типа дли измерения вибрации вала [Текст] /М.Д. Генкин, А.А. Гусаров, В.К. Кринкевич, Ю.Б. Железков (СССР). - №1472610/25-28; заявл. 18.09.70; опубл. 25.09.75. Бюл.№ 13.-2 с.

11 А.с. 1012063 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01M3/26. Устройство для контроля герметичности емкостей [Текст] /В.М. Мурашов, Е.И. Штяшн, Л.К. Лимонов, Л.В. Цвилев (СССР). - №2937448/25 –28; заявл. 09.06.80; опубл. 15.04.83. Бюл. № 14. –2 с. 12 А.с. 1173221 СССР, МКИ G01М 3/26. Устройство для контроля герметичности емкостей [Текст] /Е.И. Штяшн, В.М. Мурашов (СССР). -№3702419/25-28; заявл. 16.02.84; опубл. 15.08.85. Бюл. № 30. – 3 с.

13 А.с. 1201701 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01M 3/02. – Устройство для контроля герметичности изделий [Текст] /И.М. Бирман, И.И. Бухмиль, М.А. Фадеев, А.И. Юрченко (СССР). - №3748035/25-28; заявл.01.06.84; опубл. 23.10.85. Бюл. №48. –3 с.

14 А.с. 1245905 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01M 3/16. Полуавтомат для контроля герметичности замкнутых изделий [Текст] /Ю.Н. Княжин, А.Ю. Княжин, В.А. Ляханов, А.В. Сухов (СССР), -№3859265/25-28; заявл. 27.02.85; опубл. 23.07.86. Бюл. №27. – 4 с.

15 **А.с. 724960 СССР МКИ<sup>2</sup> G01М 3/26.** Устройство для контроля герметичности изделий [Текст] /С.Г. Сажин (СССР). - №2583400/25-28; заявл. 22.02.78; опубл. 30.04.80. Бюл. №12. – 8 с.

16 А.с.501322 СССР, МКИ<sup>2</sup> G01М 3/02. Способ испытаний изделий на герметичность [Текст] /М. С. Акимов, В. И. Барышников, В.Ю. Бронфман, В.П. Зайцев, В.И. Киреев, С.В. Окулов, К.Л. Фроловский (СССР). –№2048059/25-28; заявл. 19.07.74; опубл. 30.01.76. Бюл.№4. –3 с.

17 А.с. 748158 СССР, МКИ<sup>2</sup> G01M 3/26. Устройство для определения суммарных утечек газа из изделия [Текст] /А.С. Зажигин, А.Ф. Зайцев, В.А. Тюрин, Г. Т. Лебедев (СССР). -№2679349/25-28; заявл. 30.10.78; опубл. 15.08.30. Бюл. №26. –5 с.

18 А.с. 658421 СССР, МКИ<sup>2</sup> G01M 3/26. Способ определения уровней герметичности изделий [Текст] /И.В. Корин, Н.К. Наумов, Ю.В. Воеводин (СССР), - №2375142/25-28; заявл.22.06.76; опубл. 25.04.79. Бюл. №15. – 4 с.

19 А.с. 1027560 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01М 3/26. Устройство для контроля герметичности изделий [Текст] /В.М. Политов, В.В. Новиков, Г.Г. Прокофьев (СССР). –№3412719/25-28; заявл. 29.03.82; опубл. 7.07.83. Бюл. №25. - 4 с.

20 А.с. 800759 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01М 3/26. Устройство для контроля герметичности изделий [Текст] /В.П. Рябов, Р.М. Малкин, В.Н. Ткачук, В.В. Бабкина (СССР). –№2745043/25-28; заявл. 04.04.79; опубл.23.01.81. Бюл. №4. –3 с.

21 А. с. 781648 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01M 3/26. Устройство для испытания полых изделий на герметичность [Текст] /И.В. Самыкин, А.А. Индеев (СССР). -№2710263/25-28; заявл. 08.01.79; опубл. 23.11.80. Бюл. № 43. – 4 с.

22 А.с. 815545 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01М 3/26. Устройство для контроля герметичности изделий [Текст] / К.И. Гакашвили, И.А. Кузьмин, В.Н. Кулик (СССР). -№2751334/25-28; заявл.10.04.79; опубл.21.03.81. Бюл. №11. – 4 с.

23 А.с. 737803 СССР, МКИ<sup>2</sup> G01М 3/26. Устройство для контроля герметичности [Текст] / К.И. Гакашвили, В.М. Кулик (СССР). – №2561435/25-28; заявл. 28.12.77; опубл. 30.05.80. Бюл. № 20. -3 с.

24 **А.с. 896444 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01М 3/26.** Устройство для испытаний изделий на герметичность [Текст] /А.И. Юрченко, С.Г. Сажин, Ю.Н. Макаров (СССР). –№2908491/25-28; заявл.10.04.80; опубл. 7.01.82. Бюл. №1. –2 с. 25 А.с. 800759 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01М 3/26. Устройство для контроля герметичности изделий [Текст] / В.П. Рябов, Р.М. Малкин, В.Н. Ткачук, В.В, Бабкина (СССР).-№2745043/25-28; заявл. 04.04.79; опубл. 23.01.81. Бюл. № 4. –3 с.

26 А.с. 518668 СССР, МКИ<sup>2</sup> G01М 3/26. Устройство для контроля герметичности изделий [Текст] /А.Г. Макаев, М.И. Степанов, Е.П. Рогов, А.В. Окунев, В.Ф. Андреев (СССР).- №2059605/25-28; заявл. 13.09.74; опубл. 25.07.76. Бюл. №28. -1с.

27 А.с. 934266 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01M 3/02. Манометрический способ определения суммарной утечки газа из емкости [Текст] /В.М. Мясников, С.Г. Сажин, А.И. Юрченко (СССР).- №2908490/25-28; заявл.10.04.80; опубл. 7.06.82. Бюл.№21. -1с.

28 А.с. 1165906 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01М 3/26. Устройство для контроля герметичности изделий [Текст] /Ю.Н. Грачев, А.П. Некрасов, С.И. Федин (СССР). - №3686491/25-28; заявл.06.01.84; опубл.7.07.85. Бюл. №25. –2 с.

29 А.с. 1177707 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01M 3/02. Манометрический способ определения суммарной утечки газа из изделия [Текст] / В.М. Мясников, А.И. Юрченко (СССР). – №3706310/25-28; заявл. 02.03.84; опубл. 7.09.85. Бюл. №33. – 2 с.

30 А.с. 761867 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01M 3/26. Устройство для контроля герметичности изделий [Текст] / Ю.Н. Палкин, А.П. Некрасов (СССР). -№2506132/25-28; заявл. 11.07.77; опубл.7.09.80. Бюл. №33.- 1 с.

31 А.с. 89ОО94 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01M 3/26. Устройство для контроля герметичности изделий [Текст] / Е.В. Тараканов, А.П. Некрасов, В.Я. Степанищев (СССР). -№2801260/25-28; заявл.24.07.79; опубл. 15.12.81. Бюл. №46. –1 с.

32 А.с. 934266 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01М 3/02. Манометрический способ определения суммарном утечки газа из емкости [Текст] /В.И. Мясников, С.Л. Сажин, А.И. Юрченко (СССР). -№2908490/25-28; заявл. 10.04.80; опубл.7.08.82. Бюл.№21. -1с.

33 А.с. 1191768 СССР МКИ<sup>4</sup> G01 M3/26. Устройство для измерения суммарной негерметичности [Текст] / Г.И. Агеева, В.А. Андронов, М.И. Лунев, В.И. Косинский, В.М. Смирнов, В.Г. Тихий (СССР). -№3750077/25-28; заявл. 11.06.84; опубл.15.11.85. Бюл. №42.-1 с.

34 А.с. 658421 СССР, МКИ<sup>2</sup> G01 M3/26. Способ определения уровня герметичности изделий [Текст] / В.М. Политов, В.В. Новиков, Г.Г. Прокофьев (СССР). - №2375142/25-28; заявл.22.06.76; опубл.25.04.79. Бюл. №15. –1 с.

35 **А.с. 641295 СССР, МКИ<sup>2</sup> G01 МЗ/26.** Устройство для контроля утечки газа [Текст] /Ю.Н. Жигулин, В.А. Суслыванов (СССР). - №2480965/25-28; заявл. 03.05.77; опубл.5.01.79. Бюл.№1. –1 с.

36 А.с. 641294 СССР, МКИ<sup>2</sup> G01 M3/26. Устройство для контроля утечки газа [Текст] / Ю.Н. Жигулин, В.А. Суслыванов (СССР); -№2480964/25-28; заявл.03.05.77; опубл.5.01.79. Бюл. №1. – 1 с.

37 А.с. 645045 СССР, МКИ<sup>2</sup> G01 M3/26. Устройство для контроля суммарной негерметичности изделий [Текст] / Ю.В. Воеводин, М.И. Силеверстов, Б.И. Федоткин, В.Н. Тузов, Л.В. Бередов (СССР).- №2412381/25-28; заявл. 18.10.76; опубл. 30.01.79. Бюл. № 4. – 2 с. 38 А.с. 954831 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 M3/40. Устройство для контроля герметичности изделий [Текст] / В.Д. Острун, В.Л. Куслицкий (СССР).-№ 3246843/25-28; заявл. 11.02.81; опубл. 30.08.82. Бюл. № 32. -1 с.

39 А.с. 1232975 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01 M3/06. Устройство для контроля герметичности [Текст] /Е.Л. Овчинников, В.А. Хохлов, А.И. Андерсон (СССР). -№3856192/25; заявл.24.12.84; опубл.23.05.86. Бюл.№19. – 1 с.

40 А.с. 1226098 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01 M3/26. Способ контроля герметичности [Текст] / А.И. Снилициков, В.И. Хохлов, А.И. Андерсон (СССР).-№3716008/25-28; заявл. 28.03.84; опубл.23.04.86. Бюл. №15. –1 с.

41 А.с. 697854 СССР, МКИ<sup>2</sup> G01 M3/26. Устройство для измерения малых расходов газа [Текст] /К.И. Гакашвили, В.М. Кулик (СССР).-№2562510/25-28; заявл. 29.12.77; опубл. 15.11.79. Бюл. №42. - 1 с.

42 А.с. 155889 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01 M3/26. Устройство для контроля утечек газа из изделий [Текст] /В.Н. Козырев (СССР). – №3620518/25-28; заявл. 13.07.83; опубл. 15.05.85. Бюл.№18.-2 с.

43 Химический энциклопедический словарь [Текст] / Главный ред.-р И.Л. Кнунянц. - М.: Советская энциклопедия, 1983. - 792 с. – Предм. указ.: с. 729-786. –100000 экз. (в пер.).

44 А.с. 807098 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 M3/20. Способ контроля герметичности замкнутых изделий [Текст] /В.П. Субботин, Е.В. Балашов (СССР). -№2767287/25-28; заявл.10.05.79; опубл.23.02.81. Бюл. №7. -1 с.

45 **Промышленные приборы и средства автоматизации** [Текст]: справочник / под общ. ред. В.В. Черенкова. -Л.: Машиностроение. 1987. 847 с. – Библиогр.: с. 839. – 20000 экз. (в пер.).

46 А.с. 872993 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 M3/00. Бесконтактный щуп течеискателя [Текст] /Н.С. Дедеков (СССР). -№2480938/25-28; заявл. 29.04.77; опубл. 15.10.81. Бюл.№38. -1 с.

47 **А.с. 1295246 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01 М3/02.** Бесконтактный щуп течеискателя [Текст] /В.С. Захаров (СССР). -№39546633/25-28; заявл.16.09.85; опубл.7.03.87. Бюл .№9.-1с.

48 А.с. 10529044 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 M3/02. МКИ<sup>4</sup> G01 M3/02. Бесконтактный щуп течеискателя [Текст] /Е.В. Татаренко, В.И. Шапоренко, А.И. Юрченко (СССР) - №3479431/25-28; заявл.30.07.82; опубл.7.11.83. Бюл.№20. -1 с.

49 А.с. 560151 СССР, МКИ<sup>2</sup> G01 M3/04. Бесконтактный щуп течеискателя [Текст] /А.К. Запунный, Ю.П. Маслюк, Р.Ф. Рогаль, А.М. Сабодаш, Л.С. Фельдман (СССР). - №21633887/28; заявл.29.07.75; опубл. 30.05.77. Бюл. №20. -1 с.

50 А.с. 1211618 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01 M3/02. Вихревой щуп течеискателя [Текст] / В.А. Стельмах, Б.К. Шумнов, Б.Н. Шатерников (СССР).-№3773552/25-28; заявл. 23.07.84; опубл. 15.02.86. Бюл. № 6.-1 с.

51 A.c. 711402 СССР, МКИ<sup>2</sup> G01 M3/02. Бесконтактный щуп течеискателя [Текст] /С.Г. Сажин, Е.В. Тараненко, А.И. Юрченко (СССР).-№2648265/25-28; заявл.12.07.73; опубл.25.01.80. Бюл. №3. -1 с.

52 А.с. 945700 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 M3/02. Щуп течеискателя [Текст] /И.П. Титов, А.А. Корзина, Б.Д. Суворов, С.С. Моргалина, П.И. Севрюкова, Н.В. Га-

марис (СССР). - №3009450/25-28; заявл.27.11.80; опубл. 23.07.82. Бюл. №7. -2 с.

53 А.с. 530213 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 M3/02. Масс-спектрометрический течеискатель для испытания изделий на герметичность методом щупа [Текст] /Л.Е. Левина, И.В. Мейзеров, Л.Д. Муравьев, Е.Ш. Подосек, В.В. Пименов, В.А. Чирков (СССР). -№2106299/25-28; заявл.14.02.75; опубл.30.09.76. Бюл. №36. -1 с.

54 А.с. 783611 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 M3/00. Масс спектрометрический течеискатель [Текст] / Е.А. Борисов, Б.Ю. Бронфмен, В.П. Зайцев, В.И. Киреев (СССР). -№2717156/25-28; заявл.27.01.79; опубл.30.11.80. Бюл. № 44. -1 с.

55 А.с. 1153245 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 M3/02. Способ испытания на герметичность изделий с помощью масс-спектрометрических течеискателей [Текст] /В.Ю. Бронфман, В.П.З аицев, Г. И. Андрианова (СССР).- №3633019/25-28; заявл.12.08.83; опубл.30.04.85. Бюл.№16. -1 с.

56 А.с. 587362 СССР, МКИ<sup>2</sup> G01 M3/02. Галоидный течеискатель [Текст] /А.И. Запунный, Ю.П. Масюк, В.Ф. Рогаль, А.С. Фельдман; А.К. Сабодаш (СССР). -№2302437/25-28; заявл.12.12.75; опубл.5.01. 78. Бюл.№1. -2 с.

57 Шторм, Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества [Текст] / Регина Шторм; перевод с нем. Н.Н. и М.Г. Федоровых; под ред. Н.С. Райбмана. – М.: Мир,1970. –365 с. – Библиогр.: с. 353-355. – 19500 экз. (в пер.).

58 **ГОСТ 1770-74.** Технические условия на лабораторную посуду [Текст]. - Введ. 1974-18-11. -М.: Изд-во стандартов, 1986. -21 с.

59 Епанечников, В.А., Цветков А.Н. Справочник по прикладным программам для микрокалькуляторов [Текст] / В.А. Епанечников, А.Н. Цветков. -М.: Финансы и статистика, 1988. – 320 с. – Библиогр.: с. 316-317. – 40000 экз. – ISBN 5-279-00118-X (в пер.).

60 Митропольский, А.К. Техника статистических вычислений [Текст] / А.К. Митропольский. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Наука, 1971. – 481 с. – Библиогр.: с. 564-576. – 19500 экз. (в пер.).

61 Башта, Т.М. Машиностроительная гидравлика [Текст]: справочное пособие / Т.М. Башта. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с. - Библиогр.: с. 664-667. – 32000 экз. (в пер.).

62 Метрология, специальные общетехнические вопросы. Автоматизация. Приборы контроля и регулирования производственных процессов в нефтяной и нефтехимической промышленности. Серия справочников. Книга первая [Текст] / под ред. Ю. И. Шендлера. – М.: ГНТИ нефтяной и горно-топливной литературы, 1962. – 785 с. – Предм. указ.: с. 770 - 785. – 7000 экз. (в пер.).

63 Браславский, Д.А. Точность измерительных устройств [Текст] / Д.А. Браславский, В.В. Петров. – М.: Машиностроение, 1976. – 312 с. – Библиогр.: с. 306-309. – 7800 экз. (в пер.).

64 **Перник, А.Д.** Проблемы кавитации [Текст] / А.Д. Перник. – Изд. 2-е перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1966. – 486 с. - Библиогр.: с. 432-436. – 3500 экз. (в пер.).

65 Моль, Р. Гидропневмоавтоматики [Текст] / Р. Моль; перевод с француз. М.И. Мотылева. - М.: Машиностроение, 1975. –352 с. – Библиогр.: с. 350-351. – 15000 экз. (в пер.).

66 Пневматические устройства и системы в машиностроении [Текст]: справочник / под ред. д-ра техн. наук Е.В. Герц. - М.: Машиностроение, 1981. - 408с. - Библиогр.: с. 28, 63, 77, 120, 139, 169, 189, 269, 308, 351, 396. – Предм. указ.: с. 401 - 406. – 15000 экз. (в пер.).

67 А.с. 1546863 СССР, НКИ GO1M 3/06. Способ испытания изделий на герметичность [Текст] / Н.И. Жежера, Н.И. Тюков, Д.Н. Жежера (СССР).-№ 4396194/25-28; заявл. 24.03.88; опубл. 28.02.90. Бюл. №8. –2 с.

68 A.c. 1552033 СССР, НКИ GO1 M 3/26. Устройство для контроля герметичности изделий [Текст] / Н.И. Жежера, Н.И. Тюков, Д.Н. Жежера (СССР). -№4444826/25-28; заявл. 20.06.88; опубл. 23.03.90. Бюл. №11. –2 с.

69 Емцев, Б.Т. Техническая гидромеханика [Текст]: учебник для вузов / Б.Т. Емцев; М-во высш. и средн. образования СССР. – Изд. 2-е перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1987.- 440 с. - Библиогр.: с. 432. – Предм. указ.: с. 433-435. – 11000 экз. (в пер.).

70 **Физический энциклопедический словарь** [Текст] / Под ред. А.М. Прохорова. –М.: Советская энциклопедия, 1983. – 928 с. –100000 экз. (в пер.).

71 **Нагорный, В.С.** Устройства автоматики гидро- и пневмосистем [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.С. Нагорный, А.А. Денисов; Гос. комитет СССР по народн. образованию. – М.: Высшая школа, 1991. –367 с. - Библиогр.: с. 363. – Предм. указ.: с. 364 - 366. – 10000 экз. – ISBN 5-06-000712-X (в пер.).

72 Жежера, Н.И. Автоматизация контроля герметичности полых изделий [Текст]: Монография / Н.И. Жежера; Оренбург. гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2001. – 185 с. - Библиогр.: с. 179-185. – 300 экз. – ISBN 5-7410-0609-4 (в пер.).

73 **Краснов, Н.Ф.** Аэродинамика [Текст]: учебник для вузов / Н.Ф. Краснов; М-во высш. и средн. образования СССР. –М.: Высшая школа, 1971.-632с. - Библиогр.: с. 621-623. – 12000 экз. (в пер.).

74 Математический энциклопедический словарь [Текст] / Главный ред.-р Ю.В. Прохоров. -М.: Советская энциклопедия, 1988. -847 с. –150000 экз. (в пер.).

75 Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. -М.: Наука, 1975. –768 с. - Библиогр.: с. 754-758. – Предм. указ.: с. 759 -768. – 10000 экз.(в пер.).

76 Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы [Текст] / Г. Корн, Т. Корн; перевод с американ. И.Г. Арамановича, А.М. Березмана, И.А. Вайнштейна, Л.З. Румшинского, Л.Я. Цлафа; под общ. ред. И.Г. Арамановича. – Изд. пятое. – М.: Наука, 1984. –831 с. - Библиогр.: с. 796-800. – Предм. указ.: с. 801 -831. – 120000 экз.(в пер.).

77 **Иващенко, Н.Н.** Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем [Текст]: учеб. пособие для вузов / Н.Н. Иващенко; Мин-во высш. и средн. специал. образования СССР. – Изд. 4-е перераб. и доп. - М.: Машино-

строение, 1978. -736 с. - Библиогр.: с. 725-727. – Предм. указ.: с. 728 - 732. – 33500 экз. (в пер.).

78 Попов, Д.Н. Динамика и регулирование гидропневмосистем [Текст]: учеб. пособие для вузов / Д.Н. Попов; Мин-во высш. и средн. специал. образования СССР. – Изд. 2-е перераб. и доп. -М.: Машиностроение, 1987. – 464 с. – Библиогр.: с. 457-458. – Предм. указ.: с. 459-460. – 9550 экз. (в пер.).

79 **Теория автоматического управления.** Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления [Текст]: учеб. пособие для вузов / Мин-во высш. и средн. специал. образования СССР; под ред. акад. А.А. Воронова. –М.: Высшая школа, 1977. –288 с. - Библиогр.: с. 46, 84, 171, 279. – 20000 экз. (в пер.).

80 **Кремлевский, П.П.** Расходомеры и счетчики количества [Текст]: справочник / П.П. Кремлевский. – Изд. 4-е перераб. и доп. –М.: Машиностроение, 1989. – 701 с. - Библиогр.: с. 654-693. – 24800 экз. –ISBN 5-217-00412-6 (в пер.).

81 **А.с. 1613901 СССР, НКИ GO1 М 3/26.** Способ испытания изделий на герметичность [Текст] / Н.И. Жежера, Н.И. Тюков, Д.Н. Жежера, И.В. Чапалда, Ю.Р. Владов (СССР). -№ 4655765/25-28; заявл. 27.02.89; опубл. 15.12.90. Бюл. № 46. –2 с.

82 А.с. 1810775 СССР, НКИ GO1 M 3/38. Способ контроля герметичности полых изделий [Текст] / Ю.Р. Владов, Н.И. Жежера, Р.Т. Абдрашитов (СССР). -№ 4913620/28; заявл. 17.12.90; опубл. 23.04.93. Бюл. №15. –2 с.

83 Пат. № 2173569 Российская Федерация, МКИ В01D 19/00. Акустический деаэратор [Текст] / Жежера Н.И., Тугов В.В., Сердюк А.И.; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. - №2000107961/12; заявл.30.03.00; опубл.20.09.01. Бюл. №26. –8 с.

84 Коган, В.Б. Оборудование для разделения смесей под вакуумом [Текст] / В.Б. Коган, М.А. Харисов. – Изд. 2-е перераб. и доп. –Л.: Машиностроение, 1976.- 416 с. - Библиогр.: с. 407 - 409. – Предм. указ.: с. 410-412. – 9500 экз. (в пер.)

85 Основы кибернетики. Теория кибернетических систем [Текст]: учеб. пособие для вузов / Мин-во высш. и средн. специал. образования СССР; под ред. проф. К.А. Пупкова. – М.: Высшая школа, 1976. -408 с. - Библиогр.: с. 400-401. – Предм. указ.: с. 402-405. – 25000 экз. (в пер.).

86 А.с. 500382 СССР, НКИ F15B 20/00. Предохранительный клапан с серводействием [Текст] / Н.И. Жежера, В.М. Янсон (СССР). - № 1737856/25-8; заявл. 11. 01.72; опубл. 25.01.76. Бюл.№3. –1 с.

87 **Коробочкин, Б.Л.** Динамика гидравлических систем станков [Текст] / Б.Л. Коробочкин. -М.: Машиностроение, 1976. -240 с. - Библиогр.: с. 237-238. – 7800 экз. (в пер.).

88 Элементы приборных устройств. Основной курс. Приводы, преобразователи, исполнительные устройства [Текст]: учеб. пособие для вузов / Минво высш. и средн. специал. образования СССР; под ред. д-ра техн. наук, проф. О.Ф. Тищенко. – М.: Высшая школа, 1982. -263 с. - Библиогр.: с. 260-261. – 25000 экз. (в пер.). 89 Савостьянов, В.П. Расчет и конструирование деталей аппаратуры САУ [Текст]: учеб. пособие для средн. спец. учебн. заведений / В.П. Савостьянов, Г.А. Филатова, В.В. Филатов; Мин-во высш. и средн. специал. образования СССР. – М.: Машиностроение, 1982. – 328 с. - Библиогр.: с. 327. – 7000 экз. (в пер.).

90 Емельянов, А.И. Исполнительные устройства промышленных регуляторов [Текст] / А.И. Емельянов, В.А. Емельянов. – М.: Машиностроение, 1975.–224 с. - Библиогр.: с. 218-219. – Предм. указ.: с. 220-222. – 14000 экз. (в пер.).

91 Бесекерский, В.А. Микропроцессорные системы автоматического управления [Текст] / В. А. Бесекерский, Н.Б. Ефимов, С.И. Зиатдинов, В.В. Изранцев, А.В. Небылов, Н.Г. Соколов, Е.А. Фабрикант; под общ. ред. В.А. Бесекерского. – Л.: Машиностроение, 1988. –365 с. - Библиогр.: с. 355-359. – 15000 экз. (в пер.).

92 Куо, Б. Теория и проектирование цифровых систем управления [Текст] / Б. Куо; перевод с англ. В.Г. Дунаевой, Б.И. Копыловой, А.Н. Косиловой; под ред. д-ра техн. наук проф. П.И. Попова. –М.: Машиностроение, 1986. – 448 с. – Библиогр.: с. 446-447. – 13000 экз. (в пер.).