

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра механики материалов, конструкций и машин

Р.Н. Узяков, Е.В. Пояркова

# **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ В ЗАТЯНУТОМ БОЛТОВОМ СОЕДИНЕНИИ ПРИ ЦЕНТРАЛЬНОМ ДЕЙСТВИИ НАГРУЗКИ**

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика и 24.03.04 Авиастроение

Оренбург  
2018

УДК 620.10  
ББК 30.121  
У34

Рецензент – доцент, доктор технических наук Ю.А. Чирков

- Узяков, Р.Н.**  
У34 Определение сил в затянутом болтовом соединении при центральном действии нагрузки: методические указания / Р.Н. Узяков, Е.В. Пояркова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2018. – 18 с.

В методических указаниях представлено описание лабораторного практикума по теме «Расчет болтовых соединений».

Настоящие методические указания предназначены обучающимся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика и 24.03.04 Авиастроение, осваивающим дисциплины «Сопrotивление материалов», «Дефекты и повреждения деталей и конструкций летательных аппаратов», «Детали машин».

**Методические указания подготовлены в рамках реализации проектов по совершенствованию содержания и технологий целевого обучения студентов в интересах организаций оборонно-промышленного комплекса («Новые кадры ОПК–2017»).**

УДК 620.10  
ББК 30.121

© Узяков Р.Н.,  
Пояркова Е.В., 2018  
© ОГУ, 2018

## Содержание

Введение .....	4
1 Лабораторно-практическая работа «Определение сил в затянутом болтовом соединении при центральном действии нагрузки» .....	5
2 Краткие теоретические сведения .....	5
3 Изучение конструкции и возможностей лабораторного оборудования .....	9
3.1 Машина ДМ-30А .....	9
3.2 Приспособление ДМ-22А .....	12
4 Проведение испытаний .....	15
5 Контрольные вопросы .....	16
Список рекомендованных источников .....	17

## Введение

Дисциплины, связанные с изучением принципов расчета и конструирования различных деталей машин и оборудования, представляют собой основу общетехнической подготовки обучающихся направлений подготовки 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика и 24.03.04 Авиастроение.

«Соппротивление материалов» и «Детали машин» – это дисциплины общетехнической подготовки обучающихся по теории, расчету и конструированию составных частей летательных аппаратов различного назначения (разнообразных деталей и узлов). Основными задачами изучения этих предметов являются обобщение инженерного опыта создания авиационных конструкций, разработка научных основ расчета и проектирования надежных элементов и узлов конструкции.

При изучении вышеперечисленных дисциплин обучающиеся расширяют свои знания в производственно-конструкторской деятельности в области проектирования деталей и узлов авиационного и космического применения. Материалы дисциплин содержат сведения о конструкциях, типаже критериев работоспособности деталей машин, сборочных единиц и агрегатов; об основе теории совместной работы (сопряжении) деталей машин и методов их расчета.

Настоящие указания к лабораторно-практической работе по теме «Определение сил в затянутом болтовом соединении при центральном действии нагрузки» представляют собой часть методического обеспечения интерактивных занятий, входящих в цикл лабораторного практикума, способствующего углублению и закреплению теоретических знаний студентов и развитию их навыков экспериментирования (в том числе получения эмпирических зависимостей с целью прогнозирования возможного появления дефектов и повреждений деталей и конструкций летательных аппаратов).

# 1 Лабораторно-практическая работа «Определение сил в затянутом болтовом соединении при центральном действии нагрузки»

**Цель работы** – определить силы в затянутом болтовом соединении при действии на него центральной растягивающей нагрузки; определить коэффициент основной нагрузки для исследуемого соединения.

## **Оснащение работы:**

- машина ДМ-30А;
- приспособление ДМ-22А;
- резьбовое соединение – болт М16-8q;
- штангенциркуль ШЦ-125.

## 2 Краткие теоретические сведения

Сила  $F_{\delta}$ , растягивающая болт в затянутом болтовом соединении, зависит от силы затяжки  $F_{зам}$  болта и внешней силы  $F_a$ , приложенной к соединению. При этом часть внешней силы  $F_a$ , равная  $x \cdot F_a$ , дополнительно нагружает болт, а остальная  $(1 - x) \cdot F_a$  идет на разгрузку стыка соединенных деталей.

$$F_{\delta} = F_{зам} + x \cdot F_a, \quad (1)$$

где  $x$  – коэффициент основной нагрузки (показывает долю внешней нагрузки, воспринимаемой болтом в затянутом соединении), для каждого конкретного соединения не является постоянной величиной, а зависит от соотношения  $F_{зам}$  и  $F_a$ .

Затянутое болтовое соединение является статически неопределимой системой. Решение уравнения совместности упругих деформаций (болт удлиняется на столько, на сколько уменьшается сжатие деталей) в упрощенной модели соединения при  $h \leq 2d_0$  и  $F_{зат} = F_a$  (рисунок 1) позволяет выявить зависимость:

$$\chi = \lambda_d / (\lambda_d + \lambda_s), \quad (2)$$

где  $\lambda_d$  и  $\lambda_s$  – податливость соответственно деталей и болта, мм/Н.

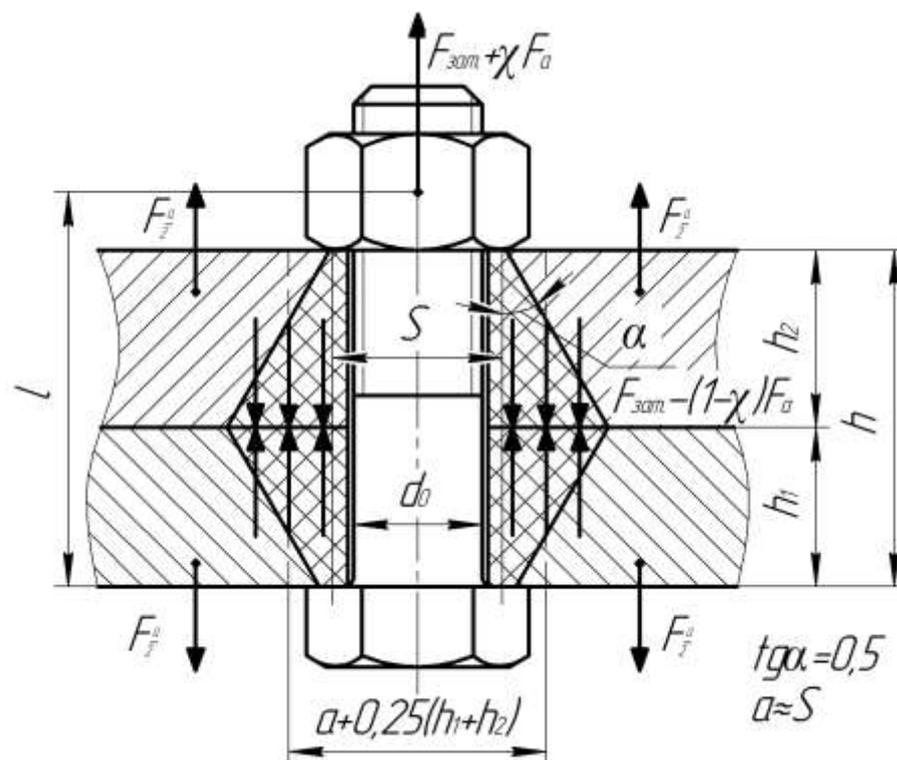


Рисунок 1 – Соединение под действием осевых нагрузок и конусы влияния (давления)

Податливость болта равна:

$$\lambda_s = l / EA, \quad (3)$$

где  $l$  – расчетная длина, равная свободной длине болта между опорными поверхностями, плюс половина длины свинчивания (высота гайки);

$E$  – модуль упругости материала болта, МПа;

$A$  – площадь сечения болта, мм<sup>2</sup>.

Податливость соединяемых деталей определяют в предположении, что деформация распространяется на так называемые конусы давления или «конусы влияния», и имеет место только внутри конусов, начинающихся от опорных поверхностей гайки и головки болта (рисунок 1).

Податливость при одинаковых толщинах соединяемых деталей:

$$\lambda_{\partial} = h / E_{\partial} \cdot A_{\partial}, \quad (4)$$

где  $h = h_1 + h_2$  – суммарная толщина деталей, мм;

$E_{\partial}$  – модуль упругости материала деталей, МПа;

$A_{\partial}$  – площадь поперечного сечения деталей, мм<sup>2</sup>.

Так как площадь поперечного сечения конуса влияния переменная, то конусы заменяют цилиндром, площадь которого в осевом сечении равна площади конусов в том же сечении, следовательно:

$$A_{\text{детали}} = \frac{\pi}{4} \left[ \left( \alpha + \frac{h_1 + h_2}{4} \right)^2 - d_0^2 \right]. \quad (5)$$

Среднее (наиболее характерное) значение коэффициента  $\chi$  для соединений металлических деталей без прокладок выбирается из интервала от 0,2 до 0,3.

В конструкциях плотных соединений для обеспечения герметичности стыка между деталями вводят упругую прокладку (резина, пластмасса и т.п.),

что существенно увеличивает суммарную податливость деталей и приводит к росту коэффициента основной нагрузки.

Сила начальной затяжки  $F_{зам}$  при условии сохранения плотности стыка:

$$F_{зам} = k \cdot (1 - \chi) \cdot F_a, \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент затяжки (запас по плотности стыка) при постоянной внешней нагрузке принимается равным в интервале от 1,3 до 1,5.

Осевая сила, действующая на затянутый болт после приложения внешней нагрузки:

$$F_{\delta} = F_{зам} + \chi \cdot F_a = [k \cdot (1 - \chi) + \chi] \cdot F_a. \quad (7)$$

Совместную работу болта и стягиваемых деталей наглядно описывает диаграмма сил в болтовом соединении (рисунок 2).

Вначале, по мере возрастания  $F_a$ , наблюдается небольшое, практически линейное увеличение  $F_{\delta}$ .

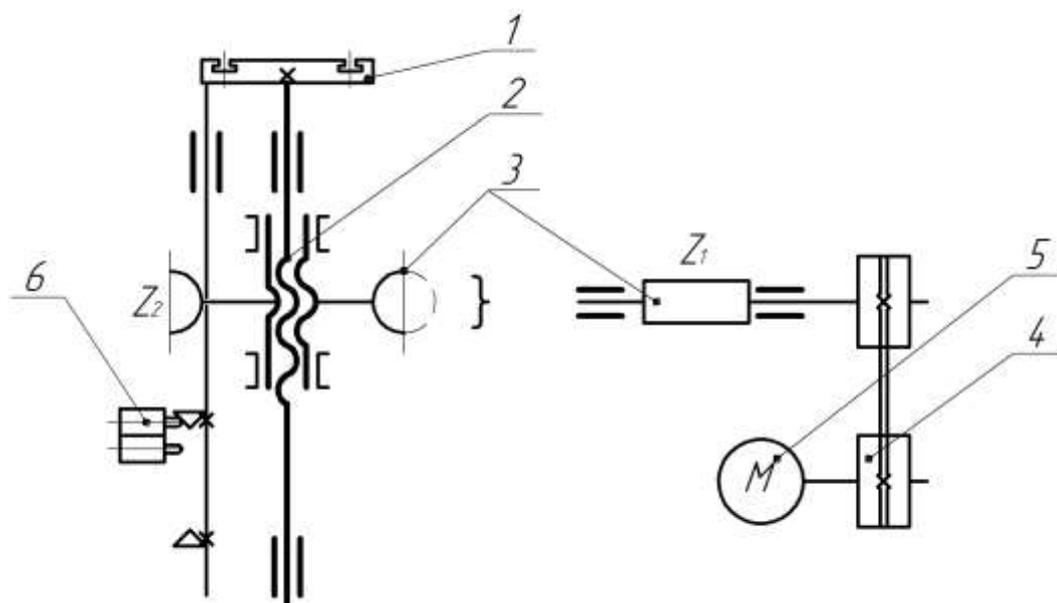
Перед раскрытием стыка зависимость  $F_{\delta} = f(F_a)$  имеет нелинейный характер, что связано с влиянием контактной жесткости стыка, деформацией витков резьбы и головки болта.

После раскрытия стыка данная зависимость снова становится линейной. Упругая прокладка увеличивает  $\lambda$  и  $\chi$  (рисунок 2), причем при податливых прокладках  $\chi \rightarrow 1$ .



на червяке. Натяжение приводного ремня осуществляется перемещением салазок винтом 6. Винты 7 служат для стопорения положения двигателя. Червячный редуктор 8 установлен в верхней части станины 1. Крышки редуктора 9, 10 служат направляющими шпинделя 11 стола 12.

Стол прямоугольной формы выполнен с пазами 13 и центрирующим отверстием 14 для установки и крепления приспособления ДМ-22А, служащего для изучения соединений.



1 – стол; 2 – винтовая пара; 3 – червячная передача; 4 – клиноременная передача; 5 – электродвигатель; 6 – конечные выключатели.

Рисунок 3 – Кинематическая схема установки ДМ-30А

Для обеспечения установки кулачков 15, 16 служит штанга 17, жестко соединенная со столом. Кулачки 15, 16 воздействуют на конечные выключатели 18.

В редукторе предусмотрен люк 19, через который можно следить за необходимым уровнем смазки, меняющимся с перемещением стола. В верхней части машины на траверсе 20 расположен пульт управления 21 и силовая панель 22. Включение происходит через автоматический выключатель 23, о наличии напряжения в электросхеме сигнализирует лампа 24.

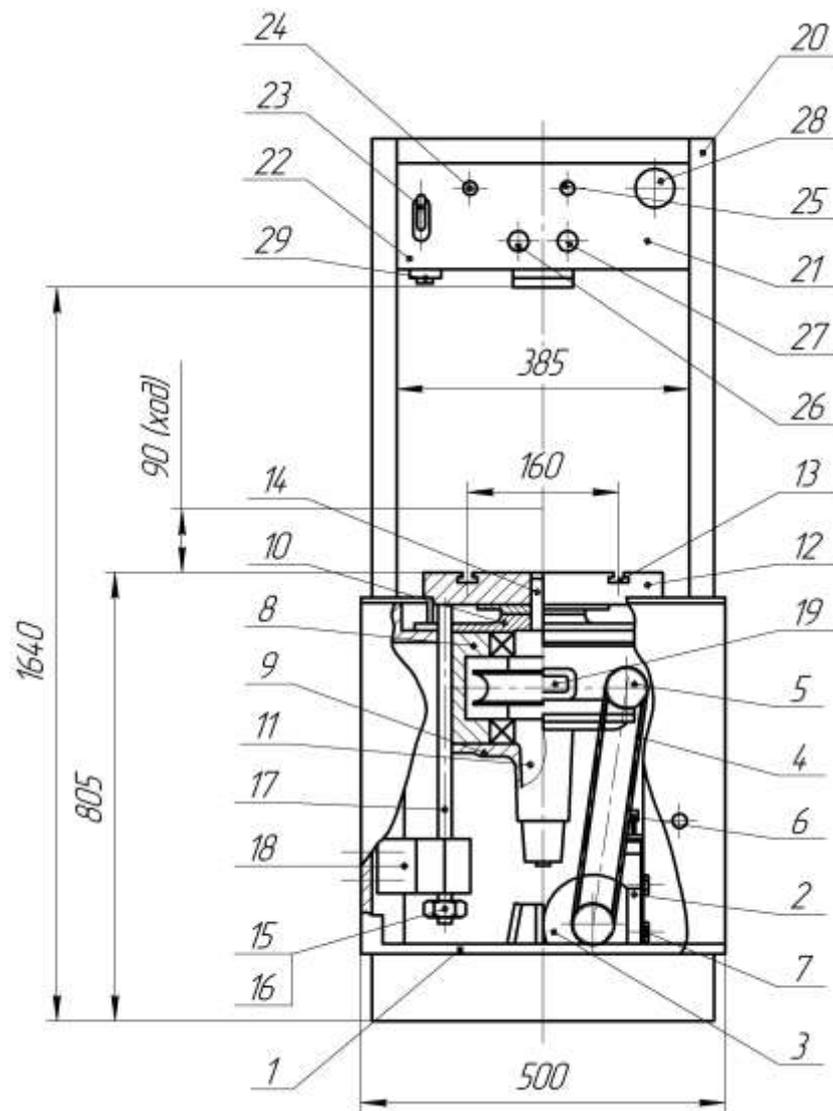


Рисунок 4 – Установка ДМ – 30А

Выбор режима (автоматический или наладочный) осуществляется переключателем 25, имеющим три положения: перемещение стола вверх, вниз и режим наладки. Автоматический режим может осуществляться только при установленном на машине приспособлении. Пуск электродвигателя в обоих режимах осуществляется:

- ход стола вниз – кнопкой 26;
- ход вверх – кнопкой 27;
- стоп машины – кнопкой 28.

На кожухе внизу расположен предохранитель (тепловая защита) двигателя – 29.

### 3.2 Приспособление ДМ-22А

В качестве вспомогательного оборудования для достижения цели, поставленной перед настоящей работой, используется лабораторное приспособление ДМ-22А, предназначенное для изучения сил в затянутом одновинтовом резьбовом соединении при действии на него осевой нагрузки.

Приспособление укомплектовано исследуемыми резьбовыми соединениями, в состав которых входят:

- болт М16-8q;
- стыкуемые детали диаметром 56 мм с высотой по длине болта 32 мм и 60 мм.

Нагрузка на силовую головку достигает 20 кН (погрешность не превышает 10 %).

Принцип действия приспособления основан на раскрытии стыка одновинтового соединения осевой нагрузкой.

Приспособление ДМ-22А содержит следующие основные части:

- основание;
- силовая головка;
- составной стакан.

Основание применяемого в работе приспособления состоит из фланца 1, шарнира 2, гайки 3, стыкуемых деталей 4 и 5, стяжного болта 6 с тензорезисторами, опорной гайки 7 (рисунок 5).

Силовая головка состоит из следующих основных деталей: корпуса 8, жестко связанного с верхним шарниром 9; присоединительного винта 10; силового датчика 11 с наклеенными на его поверхности тензорезисторами 12; тарельчатых пружин 13; кронштейна 14 с установленными на нем конечными выключателями 15.

На конце силового датчика 11 установлена на резьбе оправка 16 с выступами 17, поддерживающая накидной колпак 18. Составной стакан 19 состоит из двух половинок. Кожух 20, установленный на головке, прикрывает

конечные выключатели, которые при рабочем ходе от воздействия штоков 21 управляют двигателем машины ДМ-30А, работающем в автоматическом режиме.

Далее приспособление ДМ-22А пальцем 22 с помощью стержня 23 крепят к опорному фланцу 24 машины ДМ-30А, а основание устанавливают центрирующим выступом на стол машины 25 и крепят болтами. Головку с исследуемыми образцами навинчивают на хвостовик шарнира 2 приспособления и стопорят винтами 26, 27.

Накидной колпак 18 приподнимают и устанавливают на выступы 17. Половинки составного стакана 19 устанавливают на место, накидной колпак опускают.

Жгут 29 присоединяют к соответствующим клеммам на лицевой поверхности кожуха головки приспособления. Жгут 29 предназначен для присоединения приспособления к машине ДМ-30А, а жгут 30 для подключения приспособления к тензоусилителю.

При ходе стола машины ДМ-30А вниз силовой датчик 11 сжимает тарельчатые пружины 13 и через 15 мм хода под действием штока 21 срабатывает конечный выключатель 15 и двигатель машины реверсируется, а тарельчатые пружины возвращаются в исходное положение, второй конечный выключатель срабатывает и двигатель отключается.

Измерительный блок приспособления обеспечивает измерение сил, возникающих в испытываемом болте и силовом датчике при их нагружении, усиление полученных сигналов рассогласования и преобразование их в линейное перемещение двух взаимосвязанных координат с последующей регистрацией измеренных величин на диаграммной бумаге. Регистрирующее устройство вычерчивает на диаграмме зависимость сил, возникающих в испытываемом болте от сил, возникающих в силовом датчике при нагружении и последующем раскрытии стыка в соединении.

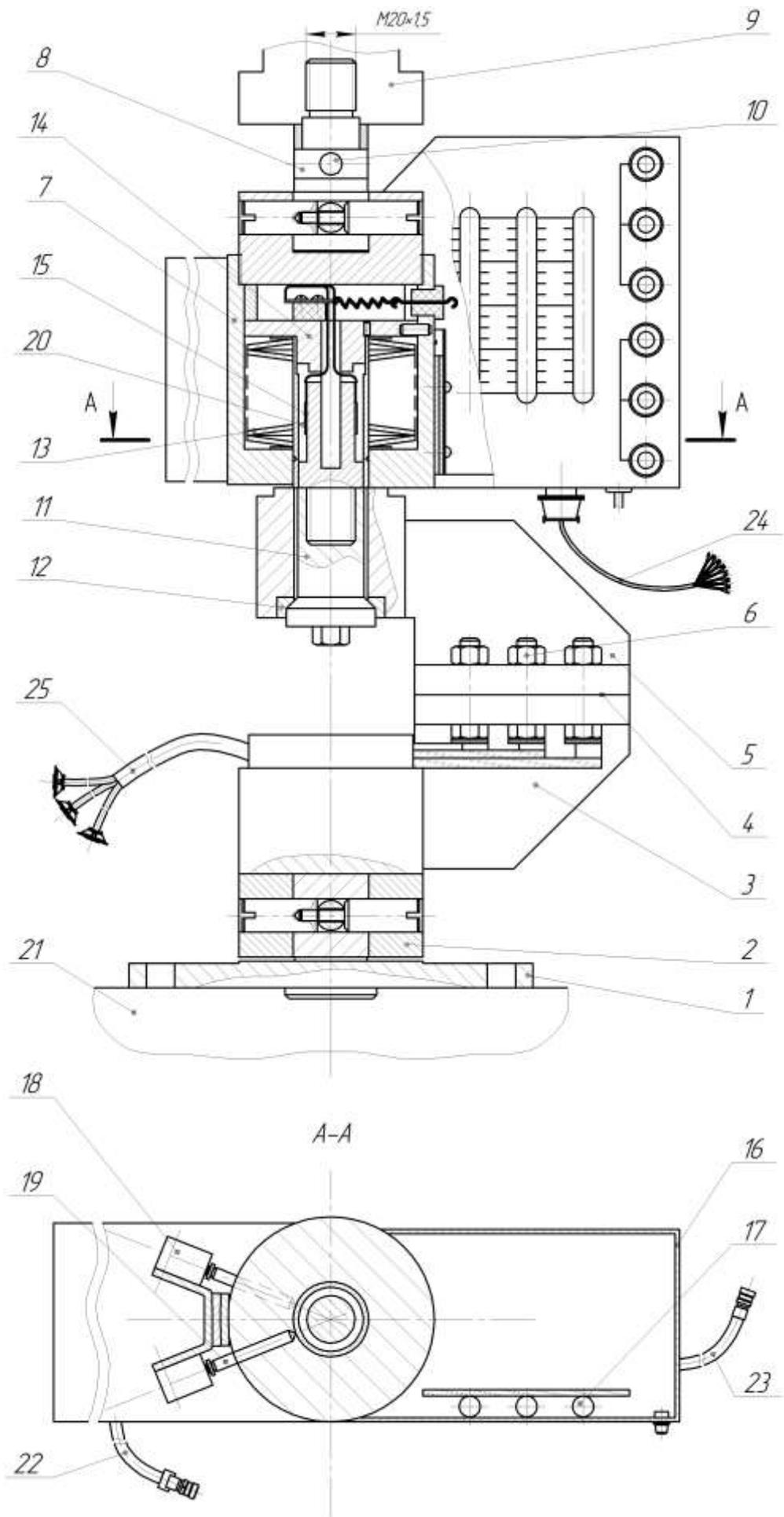


Рисунок 5 – Приспособление ДМ – 22А

## 4 Проведение испытаний

Исследуемые стыкуемые детали 4 и 5 стягивают болтом с гайкой 6 (рисунок 5) тарированным ключом до силы затяжки  $F_{зам} = 3000...8000$  Н. Эту головку в сборе устанавливают на основание приспособления, которое смонтировано на машине. Устанавливают составной стакан 19, который в верхней части накрывают накидным колпаком 18.

Задают движение стола машины ДМ-30А вниз, при этом происходит растяжение приспособления и внешняя сила через тарельчатые пружины передается на испытуемое соединение.

Силу затяжки  $F_{зам}$  болта исследуемого стыка и внешнюю силу  $F_a$ , действующую на болт, определяют с помощью, наклеенных на силовой датчик 11 и на болт 6, проволочных тензорезисторов 12, тензометрической станции и графопостроителя.

На графопостроителе получают график зависимости  $F_\delta = f(F_a)$ . После раскрытия стыка следует прекратить запись графика путем подъема пера нажатием соответствующей клавиши графопостроителя.

Далее задают движение стола машины ДМ-30А вверх. После разгрузки соединения и выключения машины проверяют отсутствие внешней нагрузки на исследуемое соединение (покачиванием приспособления ДМ-22А) и снимают затяжку болта.

В плоскости стыка между деталями устанавливают прокладку и повторяют эксперимент.

На полученных экспериментальных графиках выделяют зону, предшествующую раскрытию стыка (рисунок 2). Эту зону разбивают на три участка и для границы каждого участка определяют экспериментальные значения  $\chi$  и  $F_\delta$  (таблица 1).

Таблица 1

Вид соединения	$F_{зам}$ , Н	$\lambda_{\delta}$ , мм/Н	$\lambda_{\partial}$ , мм/Н	$\chi$ (теория)	$\chi$ (эксперимент)			$F_{\delta}$ , Н		
					I	II	III	I	II	III
Без прокладки										
С прокладкой										

В отчете приводят:

- название и цель работы;
- формулы для определения  $\lambda_{\delta}, \lambda_{\partial}, \chi, F_{\delta}, F_{зам}$ ;
- эскиз болтового соединения;
- таблицы и графики;
- анализ полученных результатов и выводы.

## 5 Контрольные вопросы

1. Приведите примеры затянутого болтового соединения.
2. Какие факторы влияют на величину  $\chi$  ?
3. Как можно уменьшить силу  $F_{\delta}$  при постоянной  $F_a$  ?
4. В каких случаях применяют упругие прокладки, и как они влияют на  $\chi$  и  $F_{\delta}$  ?
5. Запишите условие нераскрытия стыка.

## Список рекомендованных источников

1. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов / В.И. Феодосьев. –14-е изд., испр. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 590 с.: ил. – (Механика в техническом университете: В 8 т.; Т. 2).– ISBN 978-5-7038-3024-6.
2. Горшков, А.Г. Сопротивление материалов: учебное пособие / А.Г. Горшков, В.Н. Трошин, В.И. Шалашилин. – 2-ое изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.– ISBN 5-9221-0181-1.
3. Афанасьев, А.М. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов / А.М. Афанасьев, В.А. Марьин. – М.: Наука, 1975. – 287 с.
4. Стёпин, П.А. Сопротивление материалов: учебник для немашиностроительных специальностей вузов / П.А. Стёпин. – 7-е изд. – М.: Высш. школа, 1983. – 303 с.
5. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов. / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наукова Думка, 1988. – 736 с.
6. Александров, Л.И. Детали машин: лабораторные работы / Л.И. Александров, Н.П. Артеменко, Л.М. Фельдман. – 2-е изд., перераб. и доп. – Харьков: Изд-во ХГУ. – 1966. – 184 с.
7. Кушнарченко, В.М. Прикладная механика: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В.М. Кушнарченко, А.М. Ефанов, В.П. Ковалевский, Ю.А. Чирков. – изд. 2-е, испр. и доп. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – 396 с. – ISBN978-5-7410-0918-5.
8. Кушнарченко, В.М. Прикладная механика. Механизмы приборов : учебное пособие / В.М. Кушнарченко, Р.Н. Узяков, Г.А. Клещарева. – Оренбург: ОГУ, 2005. – 441 с.
9. Лабораторный практикум по прикладной механике / В.М. Кушнарченко [и др.]. – Оренбург: ОГУ, 2012. – 148 с. – ISBN 978-5-91854-073-2.
10. Механика: учебное пособие / В.М. Кушнарченко [и др.]. – Оренбург: ОГИМ, 2014. – 275 с. – ISBN 978-5-9723-0150-8.

11. Пояркова, Е.В. Механика материалов (методы механических испытаний материалов) : учебное пособие / Е.В. Пояркова, В.И. Грызунов, И.Р. Кузеев. – М.: ФЛИНТА. – 2015. – 228 с. – ISBN 978-5-9765-2481-1.
12. Механика материалов : лабораторный практикум / Е.В. Пояркова [и др.]. – Оренбург: ОГУ. – 2017. – 163 с.– ISBN 978-5-7410-1808-8.
13. Пояркова, Е.В. Механика материалов и основы конструирования: учебное пособие / Е.В. Пояркова, Л.С. Диньмухаметова. – М.: ФЛИНТА. – 2017. – 276 с. – ISBN 978-5-9765-3385-1.
14. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов : учеб. пособие для вузов / Р.В. Ромашов [и др.]; под ред. Р.В. Ромашова. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. – 123 с. – ISBN 978-5-7410-0949-9.
15. Клевцов, Г.В. Физика и механика разрушения. Основы диагностики разрушения металлических материалов [Электронный ресурс] : электронный учебник / Г.В. Клевцов, Н.А. Клевцова, О.А. Фролова; Тольят. гос. ун-т. – Тольятти: ТГУ. – 2014.
16. Кушнаренко, В.М. Лабораторный практикум по прикладной механике [Электронный ресурс] / В.М. Кушнаренко, Ю.А. Чирков, Р.Н. Узяков. – 2-е изд., стер. – М.: ФЛИНТА, 2018. – 152 с. – ISBN 978-5-9765-3990-7.