

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

Кафедра теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики

Р. С. Закируллин

# ГИДРОМЕХАНИКА

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 15.03.01 Машиностроение, 15.03.02 Технологические машины и оборудование, 18.03.01 Химическая технология, 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии, 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания, 20.03.01 Техносферная безопасность, 07.03.01 Архитектура, 07.03.03 Дизайн архитектурной среды, 08.03.01 Строительство, 08.04.01 Строительство, по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства

Оренбург  
2019

УДК 532  
ББК 22.253  
3180

Рецензент – профессор, доктор физико-математических наук С. Н. Летута

**Закируллин, Р. С.**

3180 Гидромеханика : методические указания / Р. С. Закируллин; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019.

Методические указания содержат методику проведения лабораторных и практических занятий.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ и проведения практических занятий по дисциплинам, связанным с гидромеханикой и ее разделами, для обучающихся по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение, 15.03.02 Технологические машины и оборудование, 18.03.01 Химическая технология, 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии, 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания, 20.03.01 Техносферная безопасность, 07.03.01 Архитектура, 07.03.03 Дизайн архитектурной среды, 08.03.01 Строительство, 08.04.01 Строительство, по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства всех форм обучения.

УДК 532  
ББК 22.253

© Закируллин Р. С., 2019  
© ОГУ, 2019

# Содержание

Введение .....	4
1 Лабораторная работа № 1 «Изучение относительного покоя жидкости в цилиндрическом сосуде, равномерно вращающемся вокруг своей оси».....	5
1.1 Теоретическая часть .....	5
1.2 Экспериментальная часть .....	6
1.3 Форма отчета.....	8
2 Лабораторная работа № 2 «Изучение режимов течения вязкой жидкости в трубах».....	10
2.1 Теоретическая часть .....	10
2.2 Экспериментальная часть .....	11
2.3 Форма отчета.....	14
3 Лабораторная работа № 3 «Изучение уравнения Бернулли для идеальной и вязкой жидкости» .....	16
3.1 Теоретическая часть .....	16
3.2 Экспериментальная часть .....	18
3.3 Форма отчета.....	20
4 Лабораторная работа № 4 «Исследование законов сопротивления при течении потока вязкой жидкости в круглоцилиндрических трубах».....	22
4.1 Теоретическая часть .....	22
4.2 Экспериментальная часть .....	24
4.3 Форма отчета.....	25
5 Лабораторная работа № 5 «Исследование зависимости коэффициента местного сопротивления от чисел Рейнольдса» .....	27
5.1 Теоретическая часть .....	27
5.2 Экспериментальная часть .....	27
5.3 Форма отчета.....	28

## Введение

В методических указаниях приведена информация о порядке выполнения лабораторных работ и проведения практических занятий по дисциплинам, связанным с гидромеханикой и ее разделами, для обучающихся по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение, 15.03.02 Технологические машины и оборудование, 18.03.01 Химическая технология, 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии, 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания, 20.03.01 Техносферная безопасность, 07.03.01 Архитектура, 07.03.03 Дизайн архитектурной среды, 08.03.01 Строительство, 08.04.01 Строительство, по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства всех форм обучения.

Целью разработки методических указаний является обеспечение возможности выполнения лабораторных работ и проведения практических расчетов по различным разделам гидромеханики.

Основной задачей разработки методических указаний является получение студентами навыков выполнения лабораторных работ и проведения практических расчетов, а также более квалифицированного использования литературы по гидромеханике.

# 1 Лабораторная работа № 1 «Изучение относительного покоя жидкости в цилиндрическом сосуде, равномерно вращающемся вокруг своей оси»

## 1.1 Теоретическая часть

Раздел гидромеханики, в котором изучаются условия покоя жидкости и силы, действующие в условиях покоя, называется гидростатикой. В гидростатике различают два вида покоя жидкости – абсолютный и относительный.

Если жидкость покоится по отношению к стенкам сосуда, а сам сосуд покоится по отношению к Земле, то такой вид покоя называют абсолютным. Если же жидкость покоится по отношению к стенкам сосуда, а сосуд при этом совершает неравномерное перемещение относительно Земли, то такой покой называют относительным.

Следует отметить, что в этих определениях видов покоя жидкости предполагается, что система координат, жестко связанная с Землей, является инерциальной. В соответствии с принципом относительности Галилея абсолютный покой жидкости будет иметь место и в условиях, когда сосуд с жидкостью перемещается прямолинейно и равномерно. Закон изменения давления в жидкости, покоящейся под действием центробежных и гравитационных сил, описывается формулой:

$$p(r, z) = p_0 + \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 + \rho g(z_0 - z), \quad (1.1)$$

где  $p$  – давление, Па;  $r$  – радиус, м;  $z$  – координата по вертикали, м;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  – угловая скорость, рад/с.

Уравнение свободной поверхности:

$$z = z_0 + \frac{1}{2} \frac{\omega^2 r^2}{g}. \quad (1.2)$$

Т.е. свободная поверхность является параболоидом вращения. Любая другая поверхность равного давления может быть получена эквидистантным смещением свободной поверхности вдоль оси внутрь жидкости.

В случае абсолютного покоя жидкости для проекции силы  $\vec{F}$  на оси декартовой системы координат легко найти:  $F_x = 0$ ,  $F_y = 0$ ,  $F_z = -g$ . Тогда получим уравнение:

$$p = -\rho g z + C \frac{\omega^2 r^2}{g}. \quad (1.3)$$

Постоянную  $C$  находим по условиям на свободной поверхности жидкости: при  $z = z_0$ ,  $p = p_0$ , т.е.  $C = p_0 + \rho g z_0$ , и формула (1.3) преобразуется к виду:

$$p = p_0 + \rho g (z_0 - z) = p_0 + \rho g h, \quad (1.4)$$

где  $h = z - z_0$  – заглубление жидкой частицы под свободной поверхностью. Формула (1.4) называется основной формулой гидростатики абсолютного покоя.

## 1.2 Экспериментальная часть

Схема установки для изучения относительного покоя жидкости показана на рисунке 1.1. Установка состоит из цилиндра 1, установленного на вертикальном валу 2 с опорным подшипником 3. На валу цилиндра закреплен шкив 4, кинематически связанный клиноременной передачей со шкивом 5 вала электродвигателя. Установка снабжена штангой 6, на которой закреплена рейка 7 со скользящим щупом 8. Координаты точки замера  $A(h_i, z_i)$  снимаются с измерительных шкал на щупе и рейке.

Задачи лабораторной работы:

1. Найти форму свободной поверхности жидкости в цилиндре расчетным и опытным путем.

2. Сопоставлением результатов расчета и измерения координат свободной поверхности сделать вывод о формуле (1.3).

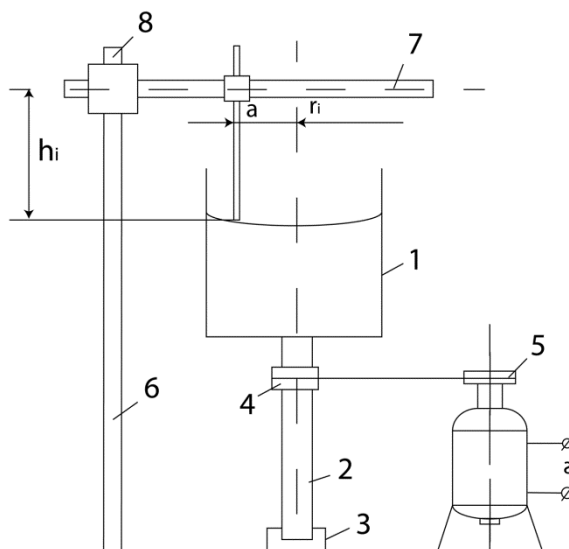


Рисунок 1.1 – Схема экспериментальной установки

Порядок проведения опытов:

1. Залить в цилиндр воду не более 1/3 его высоты.
2. Измерить расстояние от основания цилиндра до его рейки  $H$ , уровень наполнения цилиндра водой  $L$  и внутренний диаметр цилиндрического сосуда  $D$ .
3. Включить электродвигатель, через 1-2 минуты измерить расстояния  $h_i$  от рейки до свободной поверхности воды через каждые 1 см, начиная от оси вращения.
4. Занести в журнал наблюдений результаты измерений текущего радиуса  $r_i$  и отрезков  $h_i$ , а также число оборотов цилиндра  $n$  (таблица 1.1).

Обработка результатов измерений:

1. Вычислить опытные значения профиля свободной поверхности:

$$z_{on}^{(i)} = H - h_i.$$

2. Вычислить теоретическое значение отрезка  $z_T^{(0)}$  – вершины параболоида, приравняв объем воды в покоящемся  $W = \frac{\pi D^2}{4} L$  и вращающемся  $W = \frac{\pi D^2}{4} (z_T^{(0)} + \frac{\omega^2}{4g} R^2)$  цилиндре, т.е.:

$$z_T^{(0)} = L - \frac{\omega^2}{4g} R^2.$$

3. Вычислить теоретические значения профиля свободной поверхности жидкости:

$$z_T^{(i)} = z_T^{(0)} + \frac{\omega^2 r_i^2}{2g}.$$

4. Рассчитать относительную погрешность измерений в каждом опыте:

$$\Delta z_i = \left| \frac{z_T^{(i)} - z_{0n}^{(i)}}{z_T^{(i)}} \right| 100\%.$$

5. Данные расчета занести в таблицу 1.2.

### 1.3 Форма отчета

Таблица 1.1 – Исходные данные

Номер опыта	Абсцисса точки замера	Ордината точки замера	Угловая скорость
$N$	$r_2$ , см	$h_i$ , см	$\omega$ , рад/с
1	0	18,5	
2	1,5	18	
3	2,5	17,3	
4	3,5	16,7	
5	4,5	16	
6	5,5	14,8	
7	6,5	11,4	
8	7,5	10,5	



$L = 12,5 \text{ см}; H = 19,8 \text{ см}; D = 15,8 \text{ см}, n = 180 \text{ об/мин}$

Таблица 1.2 – Профиль свободной поверхности

Номер опыта	Текущий радиус вращения	Опытное значение координаты своб. поверхности	Расчетное значение координаты своб. поверхности	Погрешность измерения
$N$	$r, \text{ м}$	$z_{оп}^{(i)}, \text{ м}$	$z_m^{(i)}, \text{ м}$	$\Delta z, \%$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Построить график зависимости  $z_{T,ion} = f(z)$  по расчетным и опытным значениям точек свободной поверхности (рисунок 1.2)

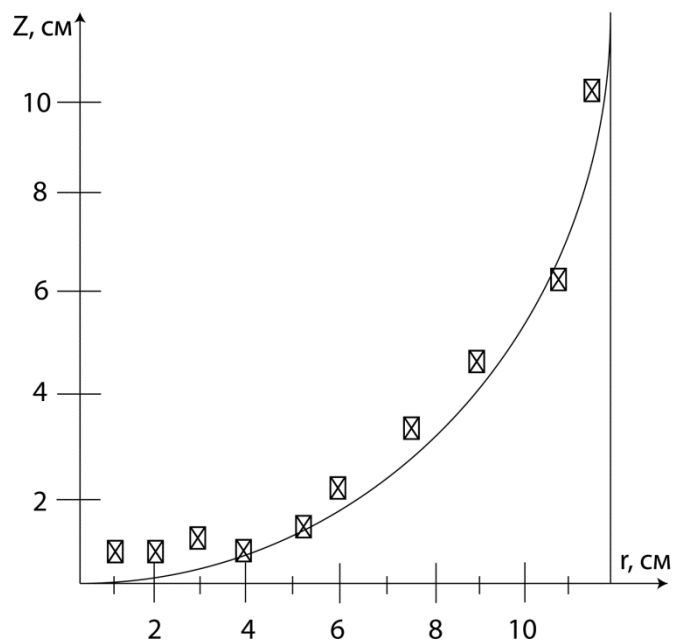


Рисунок 1.2 – Зависимость свободной поверхности от текущего радиуса

## 2 Лабораторная работа № 2 «Изучение режимов течения вязкой

### жидкости в трубах»

#### 2.1 Теоретическая часть

В 1883 году английский физик О. Рейнольдс провел классический опыт, продемонстрировавший существование принципиально различных форм течения жидкости. Опыт Рейнольдса основывался на визуализации потока подкрашенной струйки жидкости и изучение поведения этой струйки при различных скоростях течения потока в стеклянной трубе (рисунок 2.1).

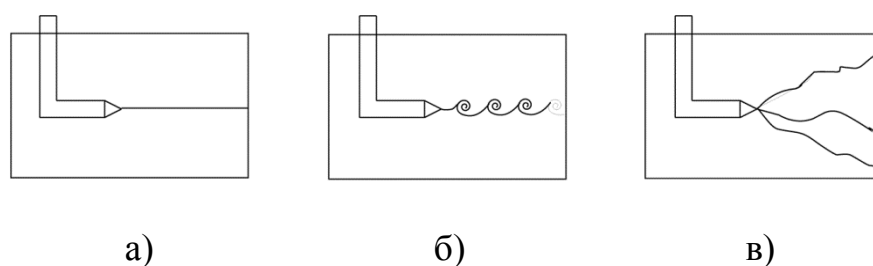


Рисунок 2.1 – Форма подкрашенной струйки при различных скоростях потока:

- а) ламинарное течение; б) течение с возмущением скорости струйки;  
в) турбулентное течение

Этот комплекс получил специальное название и называется числом Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu}, \quad (2.1)$$

где  $\nu = \mu/\rho$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости жидкости,  $\text{Па с}$ ;

Таким образом, режим течения зависит только от значения числа Рейнольдса. В качестве характерного линейного диаметра  $d$  обычно принимают гидравлический диаметр:

$$d_{\Gamma} = 4 \frac{\omega}{\chi}, \quad (2.2)$$

где  $\omega$  – живое сечение потока (в случае прямолинейных труб живое сечение совпадает с поперечным сечением),  $\chi$  – смоченный периметр живого сечения.

В таблице 2.1 показаны режимы течения вязкой жидкости и соответствующие числа Рейнольдса.

Таблица 2.1 – Три режима течения вязкой жидкости

Область ламинарного режима течения	Область переходного режима течения	Область турбулентного режима течения
$0 < Re < Re_{кр}^H$	$Re_{кр}^H$	$Re_{кр}^B < Re < \infty$

Числа  $Re_{кр}^H$  и  $Re_{кр}^B$  называются нижним и верхним критическими числами Рейнольдса. Необходимо отметить, что резкой границы перехода от одного режима течения к другому нет, поэтому числа  $Re_{кр}^H$  и  $Re_{кр}^B$  могут рассматриваться лишь как приближительные для каждой конкретной экспериментальной установки. По результатам многочисленных опытов напорного течения в трубах для чисел  $Re_{кр}^H$  и  $Re_{кр}^B$  найдены значения:

$$Re_{кр}^H \approx 2300, Re_{кр}^B \approx 4000.$$

## 2.2 Экспериментальная часть

Изучение режимов течения жидкости проводится на экспериментальной установке, показанной на рисунке 2.2.

Задачи лабораторной работы

1. Визуально убедиться в существовании ламинарного и турбулентного режимов течения.
2. Определить режимы течения в опытах по вычисленным числам Рейнольдса.

3. Построить эпюру скоростей при ламинарном режиме течения.

Порядок проведения опытов.

1. Измерить температуру воды в напорном баке 5.
2. Открыть вентили 1 и 8 и установить максимальный расход.
3. Измерить время наполнения  $T$  мерного бака 8.
4. Измерить начальный  $W_1$  и конечный  $W_2$  объемы воды в мерном баке.
5. Открыть вентиль 3 и ввести струйку краски.

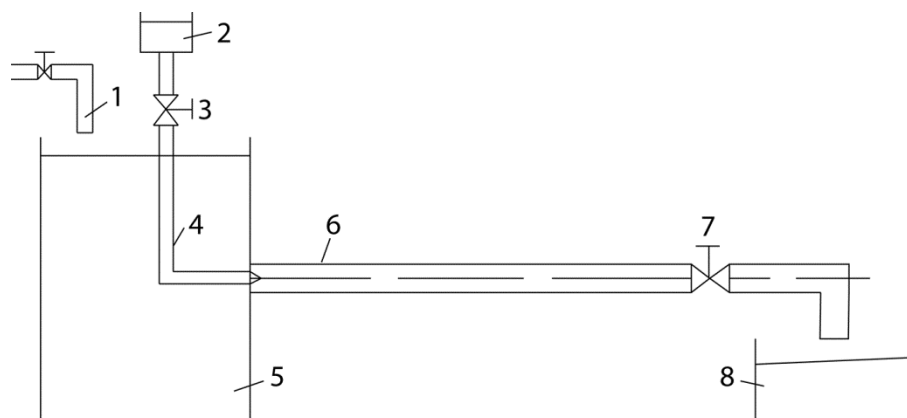


Рисунок 2.2 – Схема установки для изучения режимов течения

6. По форме струйки определить режим течения.

7. Уменьшить расход воды вентилем 7 и повторить опыты.

8. Данные опытов занести в таблицу 2.2.

Для визуального исследования формы эпюры скоростей при ламинарном режиме течения необходимо закрыть вентиль 7, ввести в трубу 6 подкрашивающую жидкость до заполнения ею некоторого объема воды в трубе, открыть вентиль 7. По мере продвижения воды в трубе подкрашенная жидкость-«облачко» будет формироваться в параболоид вращения в случае ламинарного режима течения.

Обработка результатов измерений.

1. Вычислить объемный расход жидкости:

$$Q = \frac{w_1 - w_2}{T}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Вычислить живое сечение и среднюю скорость потока:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}; \quad v = \frac{Q}{\omega}.$$

3. Вычислить динамический  $\mu$  и кинематический  $\nu$  коэффициенты вязкости:

$$\mu = 1,752 \cdot \frac{10^{-3}}{1 + 0,033t + 0,000221t^2}.$$

4. Вычислить число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu}.$$

5. Сравнить полученное число Re с критическими и сделать вывод о режиме течения в данном опыте. Данные занести в таблицу 2.3.

6. Построить эпюру скоростей для одного из ламинарных режимов течения, для чего:

а) рассчитать потери давления по формуле Пуазейля:

$$\frac{\Delta p}{l} = 8\mu \frac{Q}{\pi R^4}.$$

б) задаваясь рядом значений текущего радиуса в пределах от 0 до  $R = d/2$  – радиуса трубы, вычислить значения местной скорости по формуле:

$$u(r) = \frac{\Delta p}{4\mu l} (R^2 - r^2).$$

7. Данные расчета занести в таблицу 2.4.

### 2.3 Форма отчета

Таблица 2.2 – Исходные данные

Номер опыта	Визуальный характер течения	Объем воды в мерном баке до опыта	Объем воды после опыта	Время наполнения объема	Температура воды
$N$	-	$W_1$ , л	$W_2$ , л	$T$ , с	$t$ , град
1		0	1	47	17
2		0	1	32	17
3		0	3	51	17
4		0	3	43	17
5		0	3	24	17

Диаметр трубы  $d = 20$  мм.

Таблица 2.3 – Таблица чисел Рейнольдса

Номер опыта	Характер течения по числам Рейнольдса	Расход воды	Средняя скорость потока	Кинематический коэффициент вязкости	Число Рейнольдса
$N$	-	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$v$ , м/с	$\nu$ , м <sup>2</sup> /с	Re
1					
2					
3					
4					
5					

Таблица 2.4 – Таблица местной скорости ламинарного потока

Номер точки	Расход	Коэффициент	Текущий радиус	Местная скорость
$N$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta p/l, \text{ Па/м}$	$r, \text{ м}$	$u, \text{ м/с}$
1			0	
2			0,02	
3			0,04	
4			0,06	
5			0,08	
6			0,1	

По данным таблицы 2.4 построить эпюру скоростей ламинарного потока (рисунок 2.3).

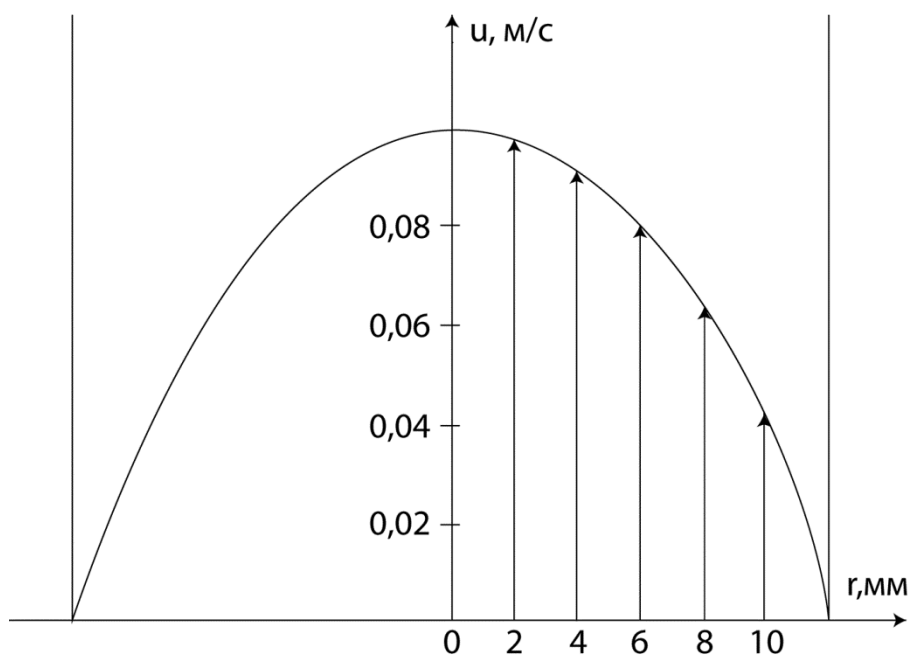


Рисунок 2.3 – Эпюра скорости ламинарного потока

### 3 Лабораторная работа № 3 «Изучение уравнения Бернулли для идеальной и вязкой жидкости»

#### 3.1 Теоретическая часть

Одним из важнейших соотношений в механике жидкостей является уравнение Бернулли. Рассмотрим его для стационарной элементарной струйки идеальной жидкости.

На рисунке 3.1 в два момента времени  $t_1 = 0$  и  $t_2 = \Delta t$  показана произвольным образом расположенная над плоскостью сравнения элементарная струйка, т.е. идеальная жидкость в элементарной трубке тока.

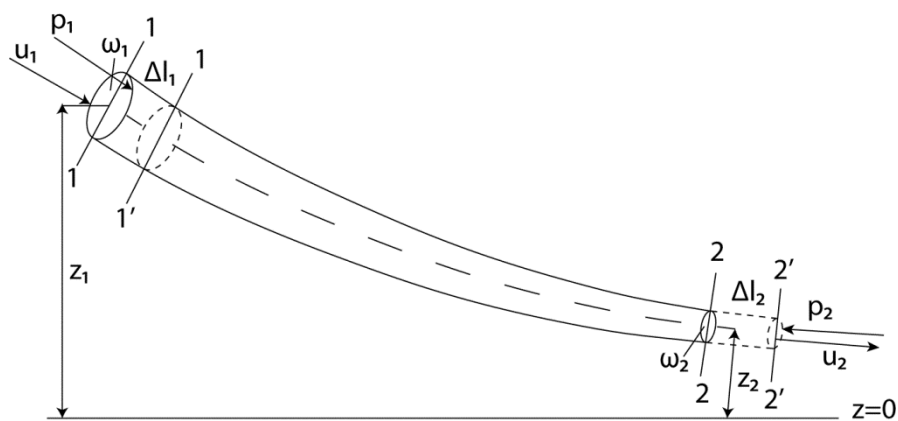


Рисунок 3.1 – Элементарная струйка идеальной жидкости

Уравнение Бернулли для стационарной элементарной струйки идеальной жидкости имеет вид:

$$p_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 = p_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho u_2^2, \quad (3.1)$$

где  $u$  – местная скорость, м/с.



Все слагаемые в этом уравнении имеют размерность давления, т.е. Па, и называются:  $p$  – статическое давление или просто давление,  $\rho g z$  – весовое давление,  $\rho u^2/2$  – динамическое давление, сумма величин  $p + \rho g z$  называется гидростатическим давлением, а трехчлен Бернулли  $p + \rho g z + \rho u^2/2$  – полным или гидромеханическим давлением.

Уравнение (3.1) можно записать в другом виде, когда все слагаемые приобретают размерность длины или, как говорят, размерность напоров:

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{u_2^2}{2g}. \quad (3.2)$$

Для обозначения этих слагаемых применяют следующую терминологию:  $p/\rho g$  – пьезометрический напор,  $z$  – геометрический напор,  $u^2/2g$  – скоростной напор,  $z + \frac{p}{\rho g}$  – гидростатический напор,  $z + \frac{p}{\rho g} + u^2/2g$  – полный напор, который в дальнейшем будем обозначать буквой  $H$ .

Из уравнения Бернулли в форме (3.1) следует, что вдоль элементарной трубки тока идеальной жидкости сумма весового, статического и динамического давлений остается величиной постоянной. Это означает, что все слагаемые могут изменяться лишь так, чтобы их сумма не изменялась.

При рассмотрении потока вязкой жидкости приходится учитывать неоднородность распределения местной скорости по живому сечению плавно изменяющегося по длине потока. В связи с этим под полным напором в каком-либо сечении потока вязкой жидкости понимают сумму:

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \alpha \frac{u^2}{2g}. \quad (3.3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса или корректив кинетической энергии, учитывает неоднородность распределения скоростей;  $u$  – средняя по сечению скорость.

Уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости утверждает, что вдоль потока остается неизменной сумма полного напора  $H$  и  $h_n$  «потерянного» напора, обусловленного работой сил трения при течении потока, т.е.:

$$H + h_n = \text{const.} \quad (3.4)$$

Если в потоке вязкой жидкости выбрать два сечения 1 и 2, то в соответствии с уравнением (3.4) можно записать  $H_1 + h_{0-1} = H_2 + h_{0-2}$ , где  $h_{0-1}$  и  $h_{0-2}$  – потери напора между нулевым и первым и нулевым и вторым сечениями потока. Переносим потери  $h_{0-1}$  в правую часть и учитывая, что разность  $h_{0-2} - h_{0-1} = h_n$  получим потери напора между первым и вторым сечениями, а также выражение для полного напора, из (3.4) получаем уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{u_2^2}{2g} + h_n. \quad (3.5)$$

### 3.2 Экспериментальная часть

Описание экспериментальной установки. На рисунке 3.2 показана схема экспериментальной установки для лабораторных работ № 3, № 4 и № 5.

Задачи лабораторной работы.

Исследовать зависимость полного и пьезометрического напоров по длине трубопровода. Выяснить характер изменения давления при изменении средней скорости.

Порядок проведения опытов.

1. Открыть оба вентиля и вращением вентиля на входе добиться постоянства уровня воды в напорном баке. Записать в журнал наблюдений полный напор воды в напорном баке  $H_0$ .

2. При открытых вентилях измерить показания пьезометрических трубок и трубок Пито на трех участках, а также время наполнения объема мерного бака.

3. Провести заданное число опытов при других величинах открытия вентиля на выходе.

4. В конце опытов измерить термометром температуру воды в мерном и напорном баках.

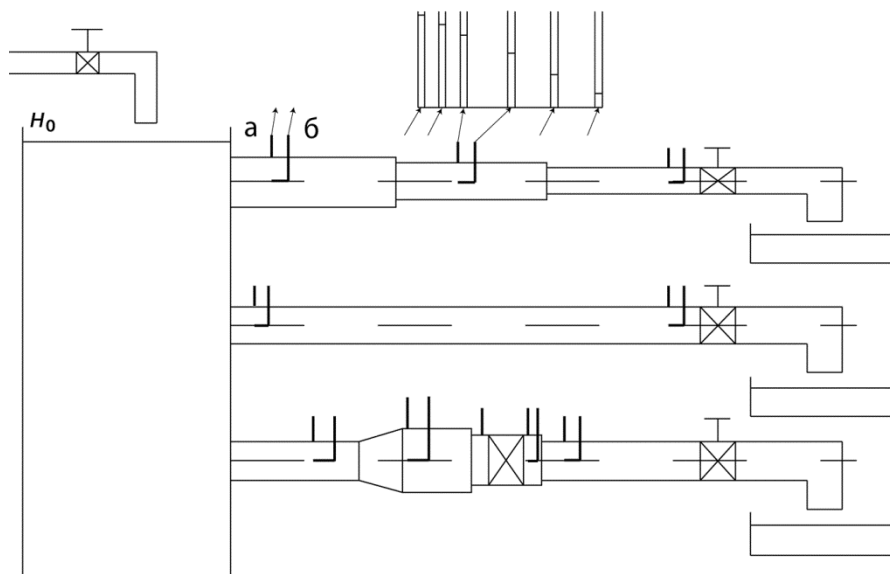


Рисунок 3.2 – Схема экспериментальной установки

5. Занести в журнал диаметры трех участков трубы.

6. Данные измерений занести в таблицу 3.1.

Обработка результатов измерений.

1. Определить величину объемного расхода жидкости в каждом опыте.

2. Вычислить площади живых сечений участков  $\omega_i = \pi d_i^2/4$  и найти средние скорости потока на каждом участке, используя уравнение расходов:  $u_i = Q/\omega_i$ .

3. Вычислить также средние скорости на участках по показаниям пьезометров и трубок Пито:

$$u_i = \sqrt{2g(h_i^n - h_i)},$$

где  $h_i^n$  – показание трубки Пито.

4. Вычислить в каждом сечении полный напор жидкости:

$$H_i = h_i + \alpha_i \frac{u_i^2}{2g},$$

где  $\alpha = 2$  для ламинарного режима и  $\alpha = 1$  для турбулентного.

5. Рассчитать потери напора по участкам:  $h_{ni} = H_0 - H_i$

6. Данные расчета занести в таблицу 3.2.

### 3.3 Форма отчета

Таблица 3.1 – Исходные данные

Номер опыта	Время опыта	Объем воды в мерном баке		Показание пьезометров и трубок Пито					
		До	После	I		II		III	
$N$	$T, c$	$W_1, л$	$W_2, л$	$h_i, мм$	$h_i^II, мм$	$h_i, мм$	$h_i^II, мм$	$h_i, мм$	$h_i^II, мм$
1	36	0	3	847	848	840	843	806	818
2	25	0	3	844	846	832	837	784	801

Диаметры участков  $d_1 = 48$  мм,  $d_2 = 32$  мм,  $d_3 = 21$  мм.  $H_0 = 0,855$  м.

Таблица 3.2 – Потери напора

Ном. опыта	Объем воды	Расход воды	Номер сеч.	Живое сечение	Средняя скорость	Скор. напор	Пол. напор	Потеря напора
$N$	$\Delta W, м^3$	$Q, м^3/с$	$i$	$\omega$	$v, м/с$	$v^2/2g, м$	$H, м$	$h_n, м$
1			I					
			II					
			III					
2			I					
			II					
			III					

1. Построить график зависимости полного напора по длине трубы (рисунок 3.3).
2. Построить график зависимости пьезометрического напора по длине трубы.

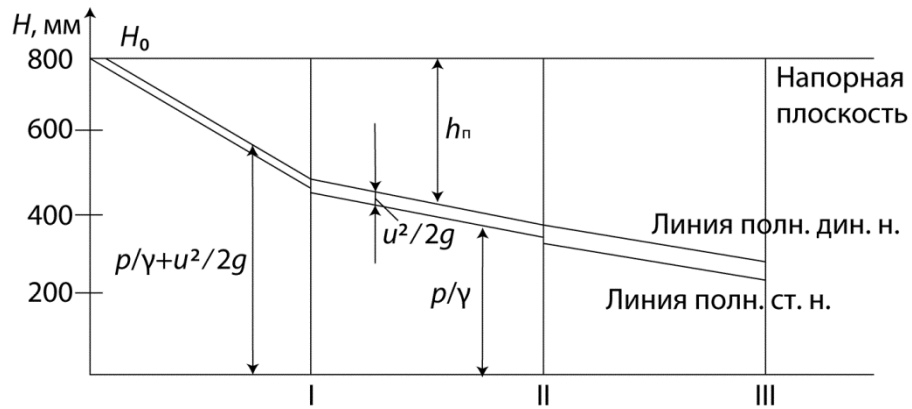


Рисунок 3.3 – Графики зависимости полного и пьезометрического напоров по длине

## 4 Лабораторная работа № 4 «Исследование законов сопротивления при течении потока вязкой жидкости в круглоцилиндрических трубах»

### 4.1 Теоретическая часть

В гидравлических расчетах часто приходится определять потери напора по длине трубопровода или потери на трение. Эти потери рассчитываются по формуле Дарси:

$$h_l = \lambda \frac{l v^2}{d 2g}. \quad (4.1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения, зависящий от чисел Рейнольдса и шероховатости внутренней поверхности трубопровода;  $l$  и  $d$  – соответственно длина трубопровода и гидравлический диаметр,  $v$  – средняя скорость потока.

Основной вопрос, возникающий при использовании формулы (4.1), состоит в определении коэффициента гидравлического трения – при известном коэффициенте  $\lambda$  задача расчета потерь напора по длине в сущности является решенной.

Для нахождения закона сопротивления при ламинарном режиме течения вычислим потерю напора:

$$h_l = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{8\mu l v}{\rho g R^2}. \quad (4.2)$$

Сравнивая эту потерю напора с формулой Дарси и выражая коэффициент  $\lambda$ , найдем Пуазейлев закон сопротивления:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}; \text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu}; d = 2R. \quad (4.3)$$

Под законом сопротивления понимают зависимость коэффициента гидравлического трения от чисел Рейнольдса.

При турбулентном режиме течения не существует столь простого вывода закона сопротивления. До конца этот вопрос не получил разрешения в механике жидкостей и связан с решением проблемы турбулентности. Для расчета предложено множество формул.

Формула Блазиуса:  $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$ , ( $4000 < Re < 10^5$ ).

Формула Конакова:  $\lambda = (1,8 \lg Re - 1,5)^{-2}$ , ( $4000 < Re < 3 \cdot 10^6$ ).

Универсальная формула Альштуля:  $\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$ , справедливая во всех трех зонах турбулентного режима течения. Отношение абсолютной шероховатости  $\Delta$  (высоты микронеровностей в мм) к диаметру трубы называют относительной шероховатостью  $\bar{\Delta} = \Delta/d$ .

Формула Шифринсона:  $\lambda = 0,11 \sqrt[4]{\bar{\Delta}}$ , справедливая для режима течения с полным проявлением шероховатости.

По Никурадзе вся область чисел Рейнольдса разбивается на пять зон сопротивления:

1 зона сопротивления – зона ламинарного режима течения. Закон сопротивления описывается формулой Пуазейля, границы зоны:  $0 < Re < 2300$ .

2 зона сопротивления – зона переходного режима течения. Закон сопротивления описывается формулой Френкеля  $\lambda = \frac{2,7}{Re^{0,53}}$  с границами:  $2300 < Re < 4000$ .

3 зона сопротивления – зона турбулентного режима течения в гидравлически гладких руслах. Закон сопротивления описывается формулами Блазиуса, Конакова и Альштуля. Границы зоны:  $4000 < Re < 20/\bar{\Delta}$ .

4 зона сопротивления – зона доквадратичного закона сопротивления. Закон сопротивления описывается формулой Альштуля. Границы:  $20/\bar{\Delta} < Re < 500/\bar{\Delta}$ .

5 зона сопротивления – зона квадратичного закона сопротивления. Закон сопротивления описывается формулами Альштуля и Шифринсона.

## 4.2 Экспериментальная часть

Описание экспериментальной установки.

Работа проводится на экспериментальной установке, описание которой дано в лабораторной работе № 3.

Задачи лабораторной работы

1. Выявить пять зон сопротивления экспериментальной трубы.
2. Определить экспериментальные значения коэффициента гидравлического трения.
3. Построить графики зависимости расчетного значения  $\lambda_p$  и нанести на них опытные значения коэффициента гидравлического трения  $\lambda_0$ .
4. Сравнить экспериментальные и расчетные значения коэффициентов. Определить погрешность измерений.
5. Сделать вывод о проделанной работе.

Порядок проведения опытов.

1. Записать в журнал наблюдений диаметр трубопровода, абсолютную шероховатость, длину активного участка трубопровода, температуру воды в напорном баке.
2. При открытом выходном вентиле вращением входного вентиля добиться постоянства уровня свободной поверхности воды в напорном баке  $H = 0,853$  м.
3. Измерить расход воды объемным методом.
4. Измерить показания пьезометров  $h_1$  и  $h_2$ .
5. Провести 7 опытов при различном открытии выходного вентиля.

Обработка результатов наблюдений.

1. Вычислить расход воды.
2. Вычислить коэффициент кинематической вязкости.
3. Вычислить число  $Re$ , предельные числа Рейнольдса  $Re'_{пр} = 20/\bar{\Delta}$  и  $Re''_{пр} = 500/\bar{\Delta}$  и определить зону сопротивления.



4. По известной зоне сопротивления выбрать расчетную формулу для  $\lambda$  и рассчитать этот коэффициент.

5. По формуле Дарси рассчитать коэффициент  $\lambda_0$  при измеренных значениях средней скорости и потерь напора:  $\Delta h = h_1 - h_2; \lambda_0 = \frac{2gd}{l} \cdot \frac{\Delta h}{v^2}$ .

6. Определить относительную погрешность:  $\delta\lambda = \left| \frac{\lambda_p - \lambda_0}{\lambda_p} \right| 100\%$ .

### 4.3 Форма отчета

Исходные данные: внутренний диаметр  $d = 26$  мм; длина активного участка  $l = 2240$  мм; абсолютная шероховатость  $\Delta = 0,104$  мм; температура воды  $t = 18^\circ$ .

Таблица 4.1 – Величины, измеренные в опыте

Номер опыта	Время опыта	Объем воды в мерном баке		Показания пьезометров	
		До опыта	После опыта	1-го	2-го
$N$	$T, \text{с}$	$W_1, \text{л}$	$W_2, \text{л}$	$h_1, \text{мм}$	$h_2, \text{мм}$
1	32	0	1	848	847
2	48	0	3	845	842
3	36	0	3	841	837
4	30	0	3	835	828
5	26	0	3	821	812
6	22	0	3	802	791
7	14	0	3	787	762

Таблица 4.2 – Зоны сопротивления

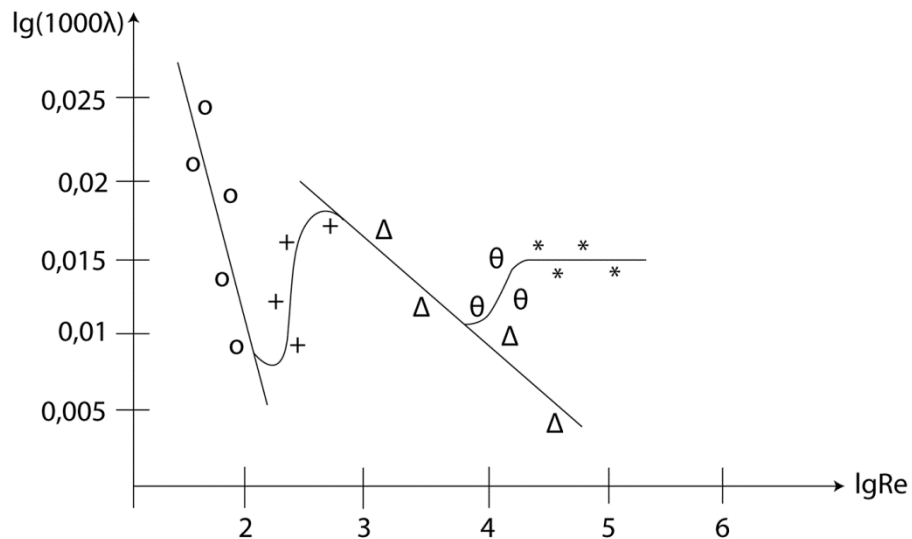
Номер опыта	Расход воды	Средняя скорость воды	Кинематический коэффициент вязкости	Число Рейнольдса	Номер зоны сопротивления
$N$	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$v, \text{м/с}$	$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	Re	-
1					
...					
7					

Таблица 4.3 – Коэффициенты гидравлического трения

Номер опыта	Опытный коэффициент	Расчетный коэффициент	$lg(1000\lambda_0)$	$lg(1000\lambda_p)$	Погрешность
$N$	$\lambda_0$	$\lambda_p$	-	-	$\delta\lambda, \%$
1					
...					
7					

Графические материалы

По результатам опытов и расчета построить график по образцу, приведенному ниже.



o – I зона сопротивления; + – II зона сопротивления; Δ – III зона сопротивления; θ – IV зона сопротивления; \* – V зона сопротивления

Рисунок 4.1 – График зависимости  $\lambda$  от чисел Рейнольдса: линия – расчет, точки – эксперимент,  $\bar{\Delta} = idem$

## **5 Лабораторная работа № 5 «Исследование зависимости коэффициента местного сопротивления от чисел Рейнольдса»**

### **5.1 Теоретическая часть**

При течении потока вязкой жидкости через местные сопротивления, т.е. такие места в трубопроводе, где происходит резкое изменение формы границ потока, деформируется эпюра скоростей, и происходит интенсивное вихреобразование в потоке.

Крупные вихри усиливают потери энергии, благодаря чему потери напора в местных сопротивлениях могут многократно превышать потери напора по длине, равной протяженности местного сопротивления.

Местные потери рассчитываются по формуле Вейсбаха:

$$h_M = h_1 - h_2 = \xi_M \frac{v^2}{2g}, \quad (5.1)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – пьезометрические напоры до и после местного сопротивления;  $\xi_M$  – коэффициент местного сопротивления.

### **5.2 Экспериментальная часть**

Лабораторная работа № 5 проводится на установке, описанной в лабораторной работе 3, местными сопротивлениями являются резкое сужение и вентиль.

Задачи лабораторной работы.

1. На основании измерений пьезометрических напоров и расходов научиться определять коэффициенты  $\xi$  местных сопротивлений (резкое сужение и вентиль).

2. Сравнить расчетные и экспериментальные коэффициенты в зоне квадратичного сопротивления.

3. Построить график зависимости  $\xi_M = f(\text{Re})$ .

Порядок проведения опытов.

1. Записать в журнал наблюдений название местного сопротивления, диаметры трубопровода перед и за сопротивлением, температуру воды в напорном баке.

2. При открытом выходном вентиле вращением входного вентиля добиться постоянного уровня жидкости в напорном баке.

3. Измерить объем воды в напорном баке и время его заполнения.

4. Измерить показания пьезометров  $h_1$  и  $h_2$  до и после местного сопротивления.

5. Провести 7 опытов для различных значений расходов.

6. Результаты измерений внести в таблицу 1.

Обработка результатов наблюдений.

1. Вычислить расход  $Q$ .

2. Вычислить потери напора  $\Delta h = h_1 - h_2$ .

3. Вычислить кинематический коэффициент вязкости и площади сечений.

4. Вычислить скорость  $u$  в каждом сечении.

5. Вычислить скоростной напор.

6. Вычислить коэффициент  $\xi$  для каждого сопротивления.

7. Вычислить число  $Re$  в каждом сечении.

8. Результаты расчета внести в таблицу 2.

### 5.3 Форма отчета

Диаметры  $d_1 = 32$  мм,  $d_2 = d_3 = d_4 = 21$  мм.

Температура воды  $t = 19^\circ$  С.

Таблица 1 – Величины, измеренные в опыте

Номер опыта	Время опыта	Объем воды в мерном баке		Названия местных сопротивлений			
		До опыта	После опыта	Сужение		Вентиль	
				Показания пьезометров			
$N$	$T, \text{с}$	$W_1, \text{л}$	$W_2, \text{л}$	$h_1, \text{мм}$	$h_2, \text{мм}$	$h_3, \text{мм}$	$h_4, \text{мм}$
1	45	0	1	841	840	785	781
2	31	0	1	840	838	761	754
3	21	0	1	836	832	742	730
4	42	0	3	831	824	704	686
5	37	0	3	825	817	663	640
6	30	0	3	815	804	617	585
7	20	0	3	801	789	586	550

Таблица 2 – Коэффициенты сопротивления. Название местного сопротивления: вентиль. Живые сечения: до сопротивления  $S_1 =$  м<sup>2</sup>, после сопротивления  $S_2 =$  м<sup>2</sup>. Коэффициент вязкости  $\nu = 1,03 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

Номер опыта	Расход воды	Параметры до сопротивления		Параметры за сопротивлением		Потеря напора	Коэффициент
		$\nu, \text{м/с}$	Re	$\nu, \text{м/с}$	Re		
$N$	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$\nu, \text{м/с}$	Re	$\nu, \text{м/с}$	Re	$\Delta h, \text{м}$	$\xi$
1							
...							
7							

Графические материалы.

Построить график зависимости коэффициента  $\xi$  от чисел Re для сопротивления, указанного преподавателем.