

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра автоматизированного оборудования  
машиностроительного производства

**ГИДРАВЛИКА**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторных работ  
для студентов направления

15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств» всех профилей  
очной и заочной форм обучения

Воронеж 2022

УДК 532:533(075.8)  
ББК 22.253я7

**Составители:**

канд. техн. наук, доцент О. И. Попова,  
канд. техн. наук, доцент М. И. Попова

**Гидравлика:** методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направления подготовки бакалавров 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» всех профилей очной и заочной форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. О. И. Попова, М. И. Попова. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. - 39 с.

В методических указаниях изложены рекомендации к выполнению лабораторных работ, приведены необходимые теоретические основы по каждой из них, требования к оформлению отчетов, приведен библиографический список литературы. Выполнение лабораторных работ направлено на получение практических навыков проведения исследований и анализа жидкостей и газов, используемых в гидросистемах машиностроительного оборудования.

Предназначены для студентов направления подготовки бакалавров 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» очной и заочной форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ\_Гидравлика\_ЛР.2022.pdf.

Табл. 11. Ил. 16. Библиогр.: 3 назв.

**УДК 532:533(075.8)**  
**ББК 22.253я7**

**Рецензент** - А. В. Демидов, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

# ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ

Цель работы - изучение зависимости кинематического коэффициента вязкости капельных жидкостей от их температуры.

Содержание работы - определение кинематического коэффициента вязкости нефтепродуктов при помощи вискозиметра Энглера.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Вязкость динамическая (сопротивление сдвигу) - основное свойство реальных жидкостей, заключающееся в том, что при взаимном относительном перемещении слоев жидкости с определенной скоростью возникает сила сопротивления их относительному смещению. В практических расчетах часто пользуются кинематическим коэффициентом вязкости  $\nu = \mu/\rho$  - отношение динамического коэффициента вязкости  $\mu$  к плотности жидкости  $\rho$ . Согласно определению кинематического коэффициента вязкости физический смысл  $\nu$  - работа, которую необходимо совершить при относительном движении слоев жидкости для единицы массового расхода. Величина  $\nu$  зависит только от физических свойств жидкости и не зависит от условий ее движения.

Динамический и кинематический коэффициенты вязкости определяют экспериментальным путем при помощи вискозиметров разных типов и конструкций. Для определения кинематического коэффициента вязкости в лабораторной работе используется вискозиметр Энглера, состоящий из двух концентрично расположенных резервуаров (рис. 1).

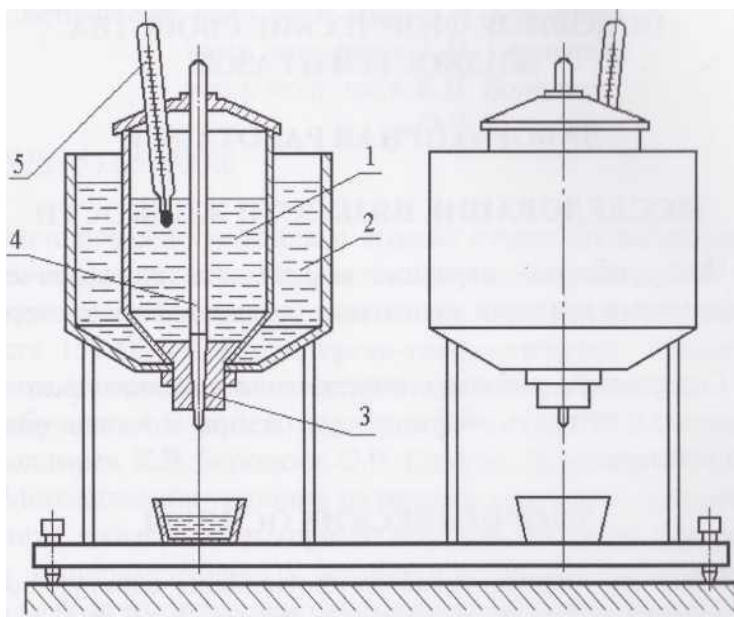


Рис. 1. Вискозиметр Энглера

В цилиндрический резервуар 1 заливается жидкость (вода или нефтепродукт), температура которой может изменяться с помощью водяной ванны 2 и фиксироваться термометром 5. При заданной температуре с помощью запорной иглы 4 открывается сопло 3, расположенное в центре резервуара 1 и обеспечивающее истечение жидкости, время которого фиксируется секундомером. При этом, вязкость выражают в градусах Энглера - отношение времени истечения исследуемой жидкости через калиброванный капилляр ко времени истечения  $t_B$  такого же объема дистиллированной воды при  $20^\circ\text{C}$  ( $293\text{ K}$ ), т.е.

$$E = t/t_B.$$

Кинематический коэффициент вязкости жидкости на основании измерений вискозиметром Энглера определяется при помощи эмпирической формулы Убеллоде:

$$\nu = 0.0731 E - \frac{0.0631}{E}, \text{Ст.}$$

Результаты замеров и вычислений вносят в отчет в виде таблицы (см. табл. 1) и строят график зависимости кинемати-

ческого коэффициента вязкости  $\nu$  от температуры нефтепродукта  $T$ , °C (рис. 2).

Таблица 1

Результаты замеров и вычислений

Жидкость	Время истечения $t$ , с		Градусы Энглера $E = t/t_0$		Кинематический коэффициент вязкости $\nu$ , Ст	
	1	2	1	2	1	2
Дистиллированная вода при 293К						
Нефтепродукт при комнатной температуре						
Нефтепродукт при $T_{нач.} + 15^\circ\text{C}$						
Нефтепродукт при $T_{нач.} + 30^\circ\text{C}$						

$\nu$ , Ст

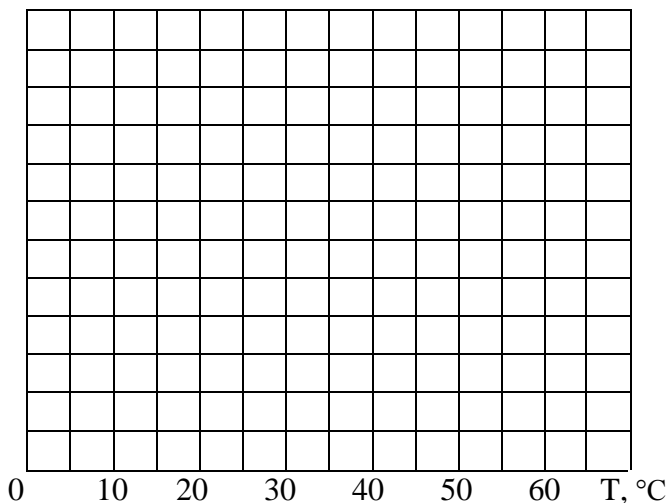


Рис. 2. Изменение вязкости от температуры  
**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ПУАЗЕЙЛЯ

Цель работы - изучение основных законов движения жидкости при ламинарном режиме течения и определение динамического коэффициента вязкости жидкости.

Содержание работы - определение динамического коэффициента вязкости воды при помощи прибора Рейнольдса и сравнение его с теоретическим значением.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Свойство жидкости, благодаря которому при ее движении проявляются силы трения, называют вязкостью. Как известно, объемный расход жидкости при ламинарном течении в трубе определяется формулой Пуазейля

$$Q = \frac{\gamma(h_1 - h_2)}{8\mu l} \pi R^4$$

где  $l$  - длина участка трубы;

$(h_1 - h_2)$  - потери напора на трение на рассматриваемой длине;

$R$  - радиус трубы;

$\gamma$  - удельный вес жидкости.

Зависимость для определения динамического коэффициента вязкости  $\mu$  жидкости будет иметь вид

$$\mu = \frac{\gamma \pi R^4}{8l} \cdot \frac{h_{\text{ТР}}}{Q}$$

Из этого уравнения следует, что для определения динамического коэффициента вязкости достаточно при известных геометрических размерах  $l$  и  $R$  измерить расход жидкости  $Q$  и разность показаний пьезометров  $h_{\text{ТР}}$ .

Эксперименты выполняются на приборе О. Рейнольдса, схема которого представлена на рис. 3.

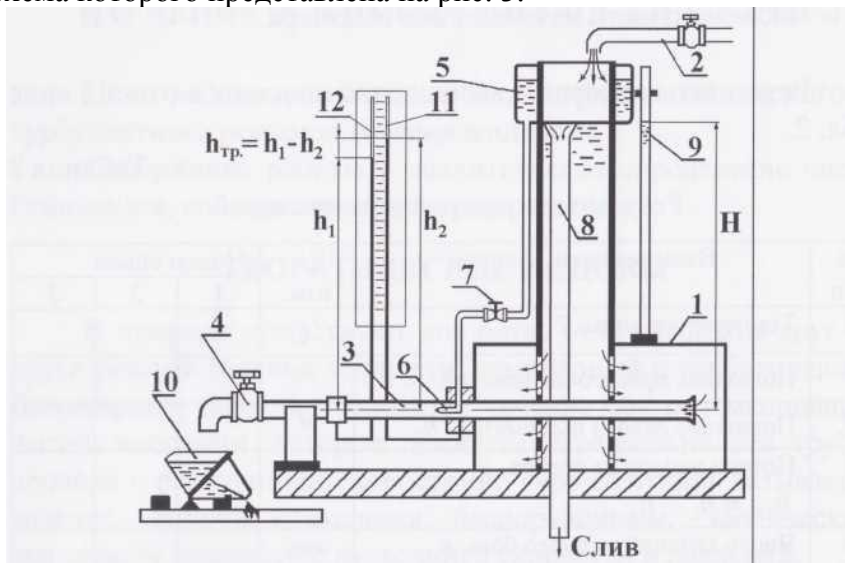


Рис. 3. Схема прибора Рейнольдса

Прибор (рис. 3) состоит из напорного бака 1, в который поступает вода по трубопроводу, снабженному вентилем 2. Для поддержания в баке постоянного уровня воды имеется сливная труба 8. Уровень воды в баке контролируется с помощью мерного стекла 9. К баку подсоединена стеклянная труба 3, в конце которой имеется вентиль 4 для регулирования расхода воды. Над баком 1 установлен кольцевой сосуд 5 с подкрашенной жидкостью. К днищу сосуда подключена трубка 6 с краном 7, при помощи которого регулируется расход подкрашенной жидкости. Открытый отогнутый конец трубки 6 установлен по оси трубы 3. Прибор снабжен качающимся водомером 10, служащим для определения расхода воды через трубу 3. На трубе 3 имеются отводы к пьезометрам 11 и 12. Пьезометры предназначены для определения потерь напора в трубе 3 на фиксированном участке. Расход жидкости  $Q$  находят по формуле

$$Q = n \cdot w / t \text{ (см}^3 \text{/с),}$$

где  $n$  - число качаний водомера за время  $t$ ;

$w$  - объем полости качающегося водомера.

Результаты замеров и вычислений вносятся в отчет в виде табл. 2.

Таблица 2

Результаты замеров и вычислений

№ п/п	Наименование величин	Ед. изм.	Номер опыта		
			1	2	3
1	Температура воды, $T$	$^{\circ}C$			
2	Показание правого пьезометра, $h_1$	$m$			
3	Показание левого пьезометра, $h_2$	$m$			
4	Потери напора на трение, $h_{тр} = h_1 - h_2$	$m$			
5	Число качаний мерного бака, $n$	<i>шт.</i>			
6	Время наполнения бака, $t$	$c$			
7	Расход воды, $Q = nw/t$	$m^3 / C$			
8	Динамический коэффициент вязкости $\mu$ при $\gamma = 9760H / m^3$ по формуле (2.2)	$Pa \cdot c$			
9	Табличное значение $\mu_T$	$Pa \cdot c$	$1004 \cdot 10^{-6}$		
10	Погрешность $\delta = \frac{ \mu - \mu_T }{\mu_T} \cdot 100$	%			

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ



Цель работы - наглядная иллюстрация ламинарного и турбулентного режимов течения жидкости.

Содержание работы - аналитическое определение чисел Рейнольдса, соответствующих этим режимам.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В природе существуют два резко отличающихся друг от друга режима течения жидкости: ламинарный и турбулентный. Ламинарным называют слоистое течение без перемешивания частиц жидкости, которые движутся параллельно оси трубопровода с различными скоростями. Турбулентным называется течение, сопровождающееся беспорядочным, хаотическим движением жидкости с пульсацией скоростей и давлений.

Английский физик О. Рейнольдс установил в 1883 г. условия, при которых возможно существование одного из указанных режимов и переход от одного к другому. Для характеристики режима течения жидкости было введено безразмерное число Рейнольдса  $Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$ . Границы существования того и другого режима определяются двумя критическими числами. Число Рейнольдса, ниже которого наблюдается устойчивое ламинарное течение, называется нижним критическим числом Рейнольдса ( $Re_{кр.н.} = 2300$ ). При числе Рейнольдса, превышающем верхнее критическое значение, наблюдается устойчивый турбулентный режим течения ( $Re_{кр.в.} \approx 4000$ ). С физической точки зрения число Рейнольдса есть величина, пропорциональная отношению сил вязкости к силам инерции. Визуальное наблюдение режимов течения жидкости проводится на приборе О. Рейнольдса (рис. 3, лаб. работа № 2).

При определении числа Рейнольдса вычисляются среднерасходная скорость  $v$  и кинематический коэффициент вязкости  $\nu$  формулам:

$$v = Q/S \text{ (см/с)},$$

где  $Q = n \cdot w/t$  (см<sup>3</sup>/с); где

$n$  - число качаний водомера за время  
 $w$  - объем полости качающегося водомера;  
 $S$  — площадь живого сечения потока в стеклянной трубе;

$$v = \frac{0,0178}{1 + 0,337T + 0,000221T^2}$$

где  $T$ - температура воды в градусах Цельсия.

Результаты замеров и вычислений вносят в отчет в виде табл. 3.

Таблица 3

Результаты замеров и вычислений

Положение вентиля	1	2	3	4
Температура воды, °C				
Кинематический коэффициент вязкости $\nu$ , $см^2 / с$				
Число качаний водомера, $n$				
Время цикла наполнения $t$ , $с$				
Объем бака водомера $w$ , $см^3$				
Расход воды $Q = nw / t$ , $см^3 / с$				
Средняя скорость воды $v$ , $см/с$				
Число Рейнольдса $Re = v \cdot d / \nu$				
Режим течения воды				

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОТЕРЬ НА ТРЕНИЕ В ТРУБЕ ОТ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Цель работы - изучение потерь напора на трение в трубе в зависимости от вида режима течения жидкости.

Содержание работы - определение зависимости потерь напора от скорости жидкости в трубе при помощи прибора Рейнольдса и построение их графического изображения.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

При переходе ламинарного течения в турбулентное изменяется характер распределения скоростей по сечению трубы, а также величина и характер гидравлических сопротивлений. Если пропускать воду по трубе с различной скоростью  $v$ , замерив при этом потери напора, построить график  $h_{\text{ТР}} = f(v)$ , то потери напора по длине потока при ламинарном режиме течения будут составлять

$$h_{\text{ТР}} = K_{\text{Л}} v,$$

где  $K_{\text{Л}}$  - коэффициент пропорциональности для ламинарного режима течения;

$v$  - средняя скорость течения потока.

При турбулентном течении потери напора по длине определяются выражением

$$h_{\text{ТР}} = K_{\text{Т}} \cdot v^n,$$

где  $K_{\text{Т}}$  - коэффициент пропорциональности для турбулентного режима течения;

$n$  - показатель степени, изменяющийся от 1,75 до 2,0. С увеличением числа Рейнольдса показатель степени увеличивается. При развитой турбулентности  $n = 2,0$

Эксперименты выполняются на приборе О. Рейнольдса, схема и описание которого приведены в лабораторной работе № 2, а результаты замеров и вычислений вносятся в отчет в виде табл. 4 и представляются графически.

Таблица 4

Результаты замеров и вычислений

№ п/п	Наименование величин	Ед. Изм.	№ опыта						
			1	2	3	4	5	6	
1	Температура воды, $T$	$^{\circ}\text{C}$							

2	Показание правого пьезометра, $h_1$	см							
3	Показание левого пьезометра, $h_2$	см							
4	Потеря напора на трение, $h_{TP} = h_1 - h_2$	см							
5	Число качаний мерного бака, $n$								
6	Время наполнения мерного бака, $t$	с							
7	Расход воды, $Q = nw/t$	см <sup>3</sup> /с							
8	Скорость течения, $v = 4Q/\pi d^2$	см/с							
9	Критическая скорость, $v_{кр} = 2300 \cdot v/d$	см/с							

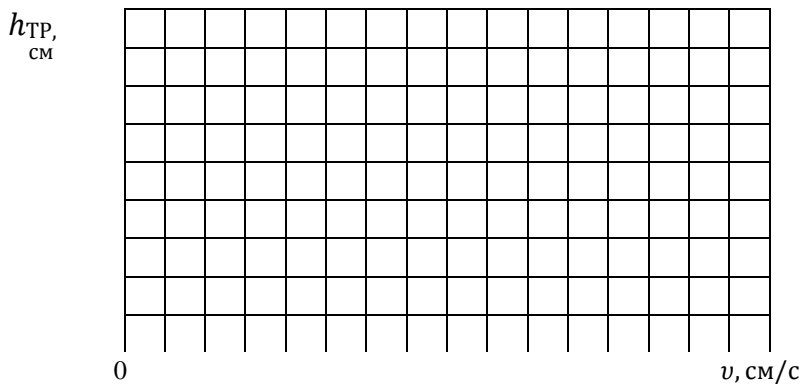


Рис. 4. Графическая зависимость  $h_{TP} = f(v)$

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ГРАДУИРОВКА РОТАМЕТРА НА ПРИБОРЕ Д. БЕРНУЛЛИ

Цель работы - изучение особенностей процесса градуи-

ровки ротаметра - прибора, применяющегося для измерения расхода жидкого или газообразного рабочего тела.

Содержание работы - ознакомление с конструкцией и принципом работы ротаметра, с основными расчетными уравнениями, используемыми при расчете его характеристик.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Ротаметры относятся к приборам для измерения секундных расходов жидкостей или газов, называемых расходомерами обтекания или расходомерами постоянного перепада давления. Ротаметр (рис. 5) в простейшем виде состоит из вертикальной конусной стеклянной трубки 1, внутри которой находится чувствительный элемент 2, выполненный в виде поплавка. Для обеспечения устойчивости работы поплавок его верхний обод снабжен каналами с крутым наклоном.

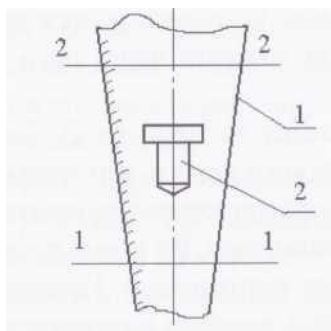


Рис. 5. Схема ротаметра

Под действием потока жидкости или газа поплавок перемещается вертикально в трубке 1, одновременно приходит во вращательное движение и центрируется в середине потока. По перемещению поплавка ротаметра вдоль его шкалы, нанесенной на конусной стеклянной трубке, судят об объеме расхода жидкости или газа.

Если допустить, что скорость при всех расходах остается

почти постоянной (потому что с увеличением расхода поплавок перемещается вверх и увеличивается площадь кольцевого канала), то величину расхода рабочей среды через ротаметр можно определить по формуле

$$Q = \alpha \cdot f_k \cdot \sqrt{\frac{2gv(\rho_{\text{п}} - \rho)}{\rho \cdot f}}$$

где  $\alpha$  - коэффициент расхода ротаметра, включающий в себя ряд геометрических и режимных параметров.

Однако, аналитическое определение величины коэффициента расхода ротаметра в значительной степени затруднено, поэтому его, обычно, определяют экспериментальным путем.

Под градуировкой ротаметра понимают выявление зависимости  $Q = Q(H)$  или  $G = G(H)$ , где  $H$  - шкала прибора (ротаметра). В результате градуировки ротаметра должна быть установлена экспериментальным путем зависимость между расходом жидкости через ротаметр и делениями шкалы, против которых устойчиво устанавливается верхний уровень поплавка ротаметра при течении через него определенного расхода жидкости.

Работа выполняется на приборе Д. Бернулли (рис. 6), состоящем из центробежного насоса, питательного бака, трех автономных, параллельно расположенных опытных участков трубопровода и набора пьезометров. Во время проведения опытов вода в системе циркулирует непрерывно. Измерение расхода жидкости осуществляется при помощи ротаметров X и Y, установленных на нагнетательной линии, которые перед

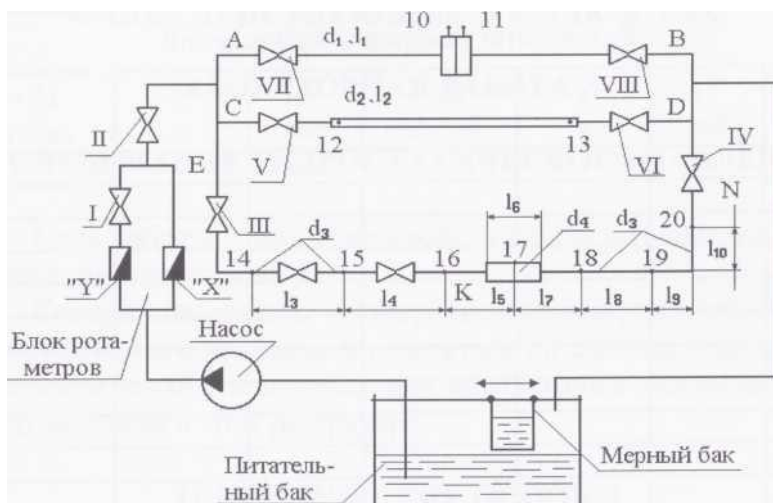


Рис. 6. Схема прибора Д. Бернулли

$(d_1 = 1,9 \text{ см}; d_2 = 1,0 \text{ см}; d_3 = 1,7 \text{ см}; d_4 = 2,8 \text{ см};$

$l_1 = l_2 = 130 \text{ см}; l_3 = l_4 = l_8 = 30 \text{ см}; l_5 = l_7 = 27 \text{ см};$

$l_9 = l_{10} = 8 \text{ см}; l_6 = 32 \text{ см})$

перед началом работ градуируют, используя для этого мерный сосуд, вмонтированный в бак. Расход жидкости определяется путем измерения времени наполнения  $\Gamma$  мерного бака известного объема ( $V = 3 \text{ л}$ ). Выводы из расчетных сечений от всех пьезометрических трубок сосредоточены на общем щите со шкалой для отсчета высоты уровня в трубках. Все пьезометры имеют общий нуль отсчетов. Направление потока жидкости и его расход регулируются при помощи соответствующих кранов и вентиляей.

На схеме прибора Д. Бернулли (см. рис. 6) показаны значения диаметров всех участков трубопровода и координаты центров рассматриваемых сечений на участке.

Результаты замеров и вычислений вносят в отчет в виде табл. 5 и строят графические изображения зависимостей

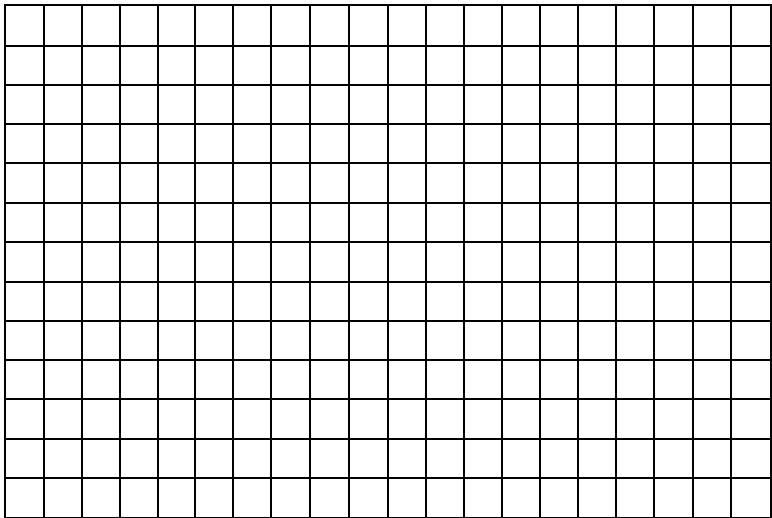
$$H_x = f(Q_x) \text{ и } H_y = f(Q_y).$$

Таблица 5

Результаты замеров и вычислений

№ п/п	$H_x,$ дел.	$\tau_x,$ с	$Q_x,$ $см^3/с$	$H_y,$ дел.	$\tau_y,$ с	$Q_y,$ $см^3/с$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						

$H,$   
дел.



$Q, см^3/с$

Рис. 7. Графические изображения зависимостей  $H = f(Q)$



# СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В ЖИДКОСТЯХ

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Цель работы - изучение свойств гидростатического давления в замкнутой области.

Содержание работы - измерение манометрического и вакуумметрического давления в резервуаре со сжатым или разреженным воздухом и определение абсолютного гидростатического давления в этом резервуаре.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Гидростатическим давлением называется напряжение сжатия в точке покоящейся жидкости (газа). Различают следующие виды гидростатического давления: манометрическое ( $P_{\text{МАН}}$ ); вакуумметрическое ( $P_{\text{ВАК}}$ ); атмосферное или барометрическое ( $P_{\text{АТМ}}$ ) и абсолютное ( $P_{\text{АБС}}$ ).

Абсолютное гидростатическое давление определяется зависимостями:

$$P_{\text{АБС}} = P_{\text{АТМ}} + P_{\text{МАН}} \text{ или } P_{\text{АБС}} - P_{\text{ВАК}} .$$

Измерение давления в замкнутом объеме проводится на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 8. Установка включает в себя герметичный резервуар 1 и открытый стеклянный баллон 3, образующих с помощью соединительного шланга 2 сообщающиеся сосуды, частично заполненные водой. Стеклянный баллон имеет подъемное устройство, позволяющее перемещать его в вертикальном направлении. При перемещении баллона вверх вода из него поступает в резервуар. Имеющийся в резервуаре воздух сжимается и давление в нем повышается. При опускании баллона происходит обратное движение воды из резервуара в баллон. Объем воздуха в резервуаре увеличивается, а давление в нем понижается.

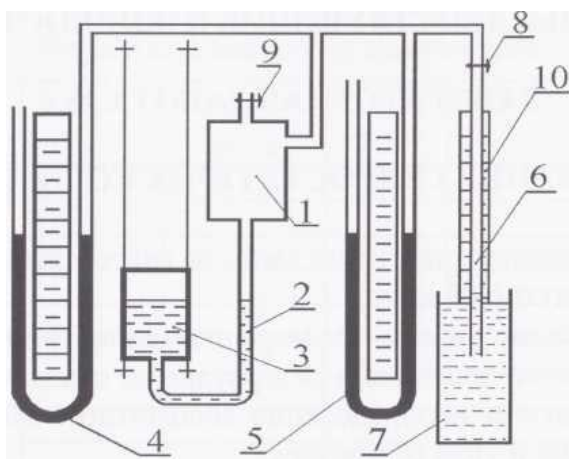


Рис. 8. Схема установки для измерения гидростатического давления

Измерение манометрического и вакуумметрического давления производится с помощью мановакуумметров, подключенных к резервуару. Мановакуумметры состоят из двух U-образных трубок 4 и 5, концы которых соединены коллектором, по которому передается давление воздуха; вторые концы трубок открыты и сообщаются с атмосферой. Трубка 4 заполнена водой с удельным весом  $\gamma_B = 9760 \text{ Н/м}^3$ , а трубка 5 - спиртом с удельным весом  $\gamma_C = 7440 \text{ Н/м}^3$ . К резервуару подключен вакуумметр 6 (обратный пьезометр). Стакан вакуумметра 7, открытый сверху, заполнен водой. При измерении манометрического давления вакуумметр с помощью крана отключается от резервуара. Измерение уровней жидкости в трубках мановакуумметров и вакуумметра производится по шкалам измерительных линеек 10. Резервуар 1 сообщается с атмосферой посредством крана 9. Измерение атмосферного давления производят при помощи ртутного барометра, с удельным весом ртути  $\gamma_{\text{рт}} = 133000 \text{ Н/м}^3$ .

Результаты замеров и вычислений вносятся в отчет в виде табл. 6

## Результаты замеров и вычислений

№ п/п	Параметры	Ед. изм.	Испытание на сжатие		Испытание на раз- ряжение	
			вода	спирт	вода	спирт
1	Левое колено $h_1$	<i>см</i>				
2	Правое колено $h_2$	<i>см</i>				
3	Разность $h_{МАН} = h_1 - h_2$	<i>см</i>				
4	$P_{МАН}$	<i>Па</i>				
5	$P_{БАР} (P_{АТМ})$	<i>мм рт. ст.</i>				
		<i>Па</i>				
6	$P_{АВС}$	<i>Па</i>				

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

## ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ПОКОЙ ЖИДКОСТИ

Цель работы - экспериментальное установление формы

свободной поверхности жидкости в круглом цилиндрическом сосуде, вращающемся с постоянной угловой скоростью вокруг собственной вертикальной оси, и аппроксимация (приближение) формы свободной поверхности, полученной из опыта, теоретическим параболоидом вращения.

Содержание работы - изучение поведения тяжелой капельной жидкости, находящейся во вращающемся сосуде, с сопоставлением расчетных и экспериментальных результатов.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Пусть открытый вертикальный прямой круглый цилиндрический сосуд с жидкостью вращается вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Жидкость, постепенно увлекаясь во вращение вследствие вязкости, в установленном режиме вращается вместе с сосудом, как единое целое с той же угловой скоростью  $\omega$ , т.е. находится в состоянии покоя относительно стенок сосуда. Это состояние поддерживается равновесием сил гидростатического давления ( $P$ ), тяжести ( $g$ ) и центробежной силы инерции ( $\omega^2 \cdot r$ ), действующих на каждую частицу жидкости (сила вязкого трения в установившемся состоянии относительного покоя отсутствует). Из уравнения равновесия Эйлера получается следующее распределение давления в жидкости

$$P = P_{\text{БАР}} - \rho g z + \frac{\rho \omega^2 r^2}{2}$$

где  $z$  - ордината жидкой частицы, отсчитанная по вертикали вверх от самой нижней точки свободной поверхности;

$r$  - расстояние до частицы по горизонтали от оси вращения;

$\omega$  - угловая скорость вращения;

$\rho$  - плотность жидкости;

$P$  - давление в жидкой частице с координатами  $z$  и  $r$ .

Из приведенного уравнения при  $P = \text{const}$  ( $dP = 0$ ) получаются уравнения поверхностей равного давления, образующих семейство осесимметричных параболоидов вращения с общей осью  $z$ . В частности, при  $P = P_{\text{БАР}}$  получается уравнение

свободной поверхности, любое меридиональное сечение которой представляет собой параболу с вертикальной осью симметрии  $z = \omega^2 r^2 / 2g$ .

Как видно из последнего уравнения, форма свободной поверхности определяется только параметрами  $\omega$  и  $r$  и не зависит от рода используемой жидкости.

Лабораторная установка (рис. 9) состоит из открытого круглого цилиндрического сосуда 1, днище которого закреплено на вертикальном валу 2, расположенном на оси симметрии сосуда. Сосуд, наполненный примерно на половину водой, приводится во вращение с постоянным числом  $n$  оборотов в минуту электродвигателем 3 через передачу 4. Определение координат свободной поверхности 5 производится с помощью координатника 6, закрепленного на неподвижной раме 7 прибора. По горизонтальным направляющим с миллиметровой шкалой 8 с помощью винта 9 перемещается каретка с измерительной иглой 10. Игла может перемещаться по вертикальным направляющим с миллиметровой шкалой 11 и фиксироваться винтом 12. Для отсчета горизонтальных и вертикальных координат на каретке и игле нанесены риски.

При математической обработке наблюдений вычисляются расстояния  $r_i$  от оси вращения до симметрично расположенных левых и правых точек с номером  $i$  по формуле

$$r_i = \frac{1}{2} \cdot (r_i'' - r_i')$$

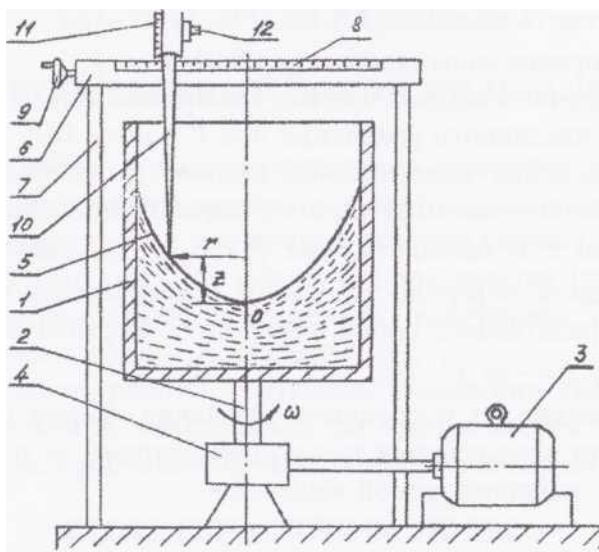


Рис. 9. Схема лабораторной установки

Опытные значения координат ( $\pm r_i, z_i$ ) наносятся на график симметрично относительно оси  $z$  и соединяются ломаной кривой (рис. 10). Форма этой кривой напоминает параболу, поэтому опытную кривую аппроксимируют уравнением

$z = Ar^2 + B$ . Из последнего уравнения для неизвестного коэффициента  $A$  получается соотношение

Подставляя вместо  $r$  и  $z$  их опытные значения  $r_i, z_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ , где  $N$  — число наблюдений), вычисляют опытные значения коэффициента  $A_i$  по формуле

$$A_i = \frac{z_i}{r_i^2},$$

где ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) и заносят их в табл. 7.

Легко видеть, что в разных наблюдениях значения  $A_i$  отличаются друг от друга. В качестве оценки истинного значения коэффициента  $A$  принимают среднее арифметическое

$$A = \bar{A} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N A_i .$$

Используя найденную величину коэффициента  $A = \bar{A}$  и придавая  $r$  значения  $\pm r_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), вычисляем и заносим в табл. 7 их теоретические значения. Точки  $(\pm r_i, z_i)$  наносим на график (рис. 10) и соединяем их плавной кривой. Это и есть наблюдаемая форма свободной поверхности жидкости в сосуде, вращающемся с постоянной угловой скоростью.

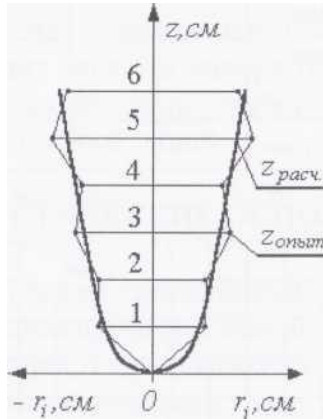


Рис. 10. Согласование опытных и расчетных данных

Результаты замеров и вычислений вносят в отчет в виде табл. 7. Графические изображения расчетных и экспериментальных зависимостей  $z = z(r)$  приводят на рис. 11.

Таблица 7

Результаты замеров и вычислений

Номер точки	1	2	3	4	5	6
Отсчет по горизонтальной шкале слева, $r'_i$ , мм						
Отсчет по горизонтальной шкале справа, $r''_i$ , мм						

Окончание табл. 7						
Ордината опытная, $Z_i$ , мм						
Опыт, значения, $A_i$ , мм <sup>-1</sup>						
Расстояние от оси вращения, $r_i$ , мм						
Расчетная ордината, $z_i$ , мм						

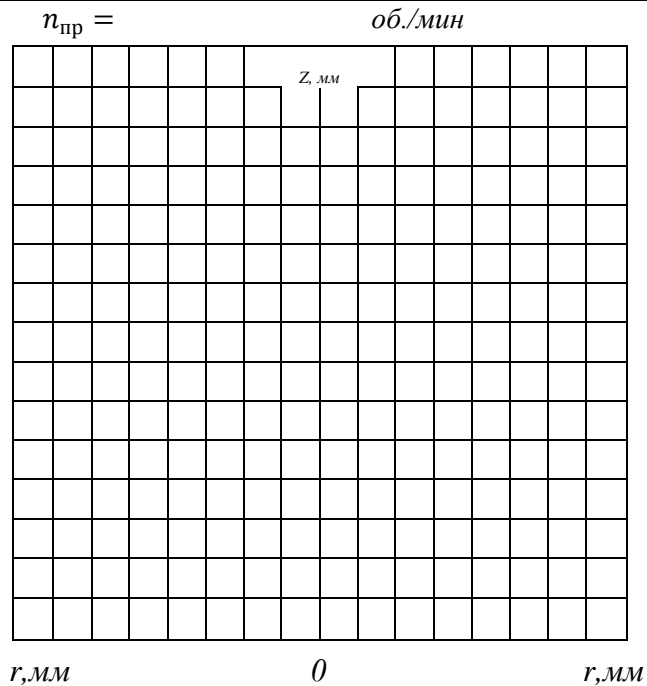


Рис. 11. Теоретическая и экспериментальная кривые  $z = z(r)$



# ОДНОМЕРНЫЕ ПОТОКИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИЛЛЮСТРАЦИЯ УРАВНЕНИЯ Д. БЕРНУЛЛИ. ПОСТРОЕНИЕ НАПОРНОЙ И ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКОЙ ЛИНИЙ

Цель работы - наглядная иллюстрация уравнения Д. Бернулли.

Содержание работы - экспериментальное определение и изучение составляющих полного напора потока и их взаимосвязи при движении жидкости по трубопроводу, построение пьезометрической и напорной линий.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Основным уравнением гидродинамики является уравнение Д. Бернулли, устанавливающее взаимосвязь между давлением в жидкости и скоростью ее движения. Уравнение Д. Бернулли для потока реальной жидкости имеет вид

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} + h_w$$

где  $\alpha$ - коэффициент Кориолиса или коэффициент кинетической энергии;

$V_1, V_2$  - соответственно, средние значения скоростей потока в сечениях 1 и 2.

Значения коэффициентов Кориолиса определяются режимом течения жидкости (или величинами чисел Рейнольдса  $Re = v \cdot d / \nu$ ) и для ламинарного (слоистого) режима течения жидкости при  $Re \leq 2300$  составляют значение . Для турбулентного (вихревого) режима течения жидкости, когда  $Re > 2300$ , обычно принимают  $\alpha = 1,1$ .

Член  $h_w$  учитывает потери напора на преодоление сопротивлений движению жидкости между двумя сечениями потока.

Уравнение Д. Бернулли может быть изображено графически. Для этого по оси абсцисс откладывают расстояние между сечениями трубопровода, а по оси ординат - значения соответствующих напоров для этих же сечений. Обычно, чтобы иметь полную характеристику трубопровода, строят пьезометрическую линию, соединяющую сумму отрезков

$(Z + \frac{p}{\gamma})$ , и напорную линию, соединяющую сумму отрезков

$$(Z + \frac{p}{\gamma} + \alpha \cdot \frac{v^2}{2g}).$$

Эксперименты выполняются на приборе Д. Бернулли, схема и описание которого приведены в отчете по лабораторной работе № 5. Результаты замеров и вычислений вносятся в отчет в виде табл.8 и строят графически изображения зависимостей  $Z + \frac{p}{\gamma}$  (пьезометрическая линия) и  $Z + \frac{p}{\gamma} + \alpha \cdot \frac{v^2}{2g}$  (напорная линия).

Таблица 8

Результаты замеров и вычислений

№ п/п	Наименование	Ед. изм	Номера пьезометров							
			14	15	16	17	18	19	20	
1	Расстояния между пьезометрами, $l$	$см$								
2	Площадь живого сечения, $\omega$	$см^2$								
3	Показания X ротаметров: $Y$	$дел.$ $дел.$								
4	Расход воды, $Q$ (по тарифовочному графику)	$см^3/с$								
5	Средняя скорость, $v$	$см/$								
6	Скоростной напор, $a - \alpha \cdot v^2/2g$	$см$								
7	Показания пьезометров, $P/\gamma$	$см$								
8	Полный напор, $H$	$см$								

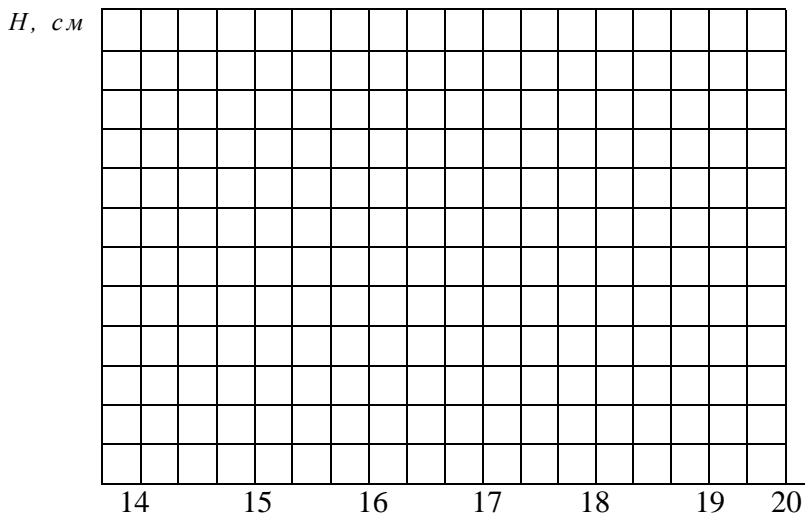


Рис. 12. Напорная и пьезометрическая линии

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОТЕРЬ НА ТРЕНИЕ ПО ДЛИНЕ ТРУБОПРОВОДА (КОЭФФИЦИЕНТА ДАРСИ)

Цель работы - исследование равномерного движения жидкости в трубе круглого сечения при ламинарном и турбулентном режимах течения.

Содержание работы - экспериментальное определение коэффициента гидравлического трения для трубы круглого сечения в зависимости от режима течения жидкости.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

При движении жидкости по трубопроводу между нею и стенками трубы возникают силы сопротивления, в результате чего частицы жидкости, прилегающие к поверхности трубы, тормозятся. Это и есть силы гидравлического трения (сопротивление гидравлического трения). Потери напора, затрачиваемые на преодоление сопротивления трения, носят название

потерь напора на трение или потерь напора по длине потока и обозначают через  $h_{TP}$ . Их можно определить по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h_{TP} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

где  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси).

Коэффициент Дарси зависит от числа Рейнольдса и от некоторой безразмерной величины, характеризующей пограничную геометрию поверхности трубопровода. Геометрической характеристикой поверхности является относительная шероховатость  $\delta$ , определяемая в соответствии с выражением  $\delta = \Delta/d$ .

Никурадзе и А.П. Загжда было установлено существование четырех зон сопротивлений, каждая из которых характеризуется определенными закономерностями.

I зона - зона ламинарного течения (вязкостного сопротивления) имеет место при  $Re < Re_{KP} = 2300$ .

В этой зоне  $h_{TP} = f(Re)$ , причем  $\lambda = 64 / Re$ .

В диапазоне  $2300 < Re < 4000 - 5000$  происходит смена режимов течения жидкости от ламинарного к турбулентному (переходная зона).

При  $Re > 4000 - 5000$  в трубе устанавливается турбулентный режим течения, однако при турбулентном режиме у стенки сохраняется ламинарный подслой, толщина которого может быть определена выражением

$$\delta_{ПД} = 30d / (Re \cdot \sqrt{\lambda}).$$

В зависимости от соотношения  $\delta_{ПД}$  и  $\Delta$  явления при турбулентном течении можно разбить на три зоны.

Для зоны гидравлически гладких труб характерно

$$\delta_{ПД} > \Delta, h_{TP} = f(Re) \text{ и } \lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, (Re \leq 10^5) \text{ или}$$

$$\lambda = 0,032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}} \cdot (Re = 5 \cdot 10^4 \div 3 \cdot 10^6).$$

Для зоны доквадратичного сопротивления величина потерь  $h_{TP}$  и коэффициент  $\lambda$  зависят как от числа Рейнольдса, так и от относительной шероховатости

В зоне квадратичного сопротивления коэффициент  $\lambda$  практически не зависит от числа Рейнольдса, а является функцией только относительной шероховатости. При этом

$$\lambda = \frac{1}{(21\lg(d/\Delta_3)+1,14)^2} \text{ или } \lambda = 0,11 \cdot (\Delta_3/d)^2$$

А.Д. Альтшуль предложил формулу, охватывающую все три зоны сопротивления при турбулентном движении жидкости в трубах с естественной шероховатостью в виде

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_3}{d}\right)^{0,25}.$$

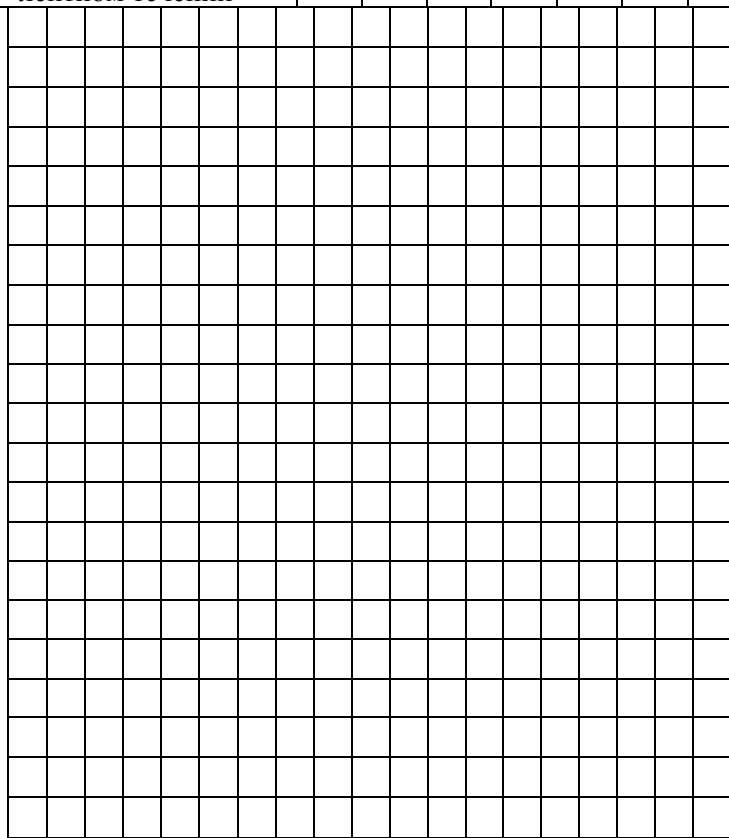
Эксперименты выполняются на приборе Д. Бернулли, схема (рис. 6) и описание которого приведены в отчете по лабораторной работе № 5. Результаты замеров и вычислений вносятся в отчет в виде табл. 9 и строят графическую зависимость  $\lg(1000\lambda) = f(Re)$ .

Таблица 9

Результаты замеров и вычислений

№ п/п	Наименование	Опыты						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Показания ротаметров:							
	«X», дел.							
	«Y», дел.							
2	Расход воды, $Q, \text{ см}^3 / \text{ с}$							
3	Средняя скорость, $v, \text{ см/с}$							
4	Показания пьезом. 12, $\text{ см}$							
5	Показания пьезом. 13, $\text{ см}$							
6	Потеря напора на трение, $h_{TP} = (p_{12} - p_{13})/\gamma, \text{ см}$							
7	Коэффициент Дарси, $\lambda$							

8	Температура воды, /, °C						
9	Коэффициент вязкости, $\nu$ , см <sup>2</sup> /с						
10	Число Рейнольдса, $Re$						
11	$lg(1000\lambda)$						
12	$lg(Re)$						
13	Значения $\lambda$ при ламинарном течении						
14	Значения $\lambda$ при турбулентном течении						

 $lg(1000\lambda)$  $Re$ Рис. 13. Графическая зависимость  $lg(1000\lambda) = f(Re)$

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Цель работы - изучение способа оценки местных гидравлических сопротивлений.

Содержание работы - определение коэффициентов местных сопротивлений (КМС) арматуры и фасонных частей трубопровода, эквивалентной длины трубопровода и зависимости этих величин от числа Рейнольдса.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

При движении жидкости по трубам и каналам часть энергии потока жидкости расходуется на преодоление разного рода местных сопротивлений. В отличие от потерь на трение по длине трубопровода, распределенных на всем его протяжении, местные потери носят локальный характер. Местные потери  $h_M$  в гидравлических расчетах принято выразить в долях от скоростного напора

$$h_M = \xi \cdot \frac{V^2}{2g}$$

где - коэффициент местного гидравлического сопротивления.

Квадратичная зависимость наблюдается только при относительно больших числах Рейнольдса (более 1000), когда КМС зависит только от конфигурации самого сопротивления и не зависит от числа Рейнольдса. Во всех других случаях КМС является функцией числа Рейнольдса. В подавляющем большинстве случаев величина КМС не может быть определена теоретическим путем и находится по результатам экспериментов.

Эксперименты выполняют на приборе Д. Бернулли, схема (рис.6) и описание которого приведены в отчете по лабораторной работе № 5. Результаты замеров и вычислений вносят в отчет в виде табл. 10 и строят графические зависимости  $\xi = f(Re)$  и  $l_3 = f(Re)$ .

## Результаты замеров и вычислений

№ п/п	Наименование	Опыты						
		1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Показания ротаметров: «X», дел.							
	«Y», дел.							
2	Расход воды, $Q, \text{см}^3 / \text{с}$							
3	Температура воды, $t, \text{°C}$							
4	Коэффициент вязкости, $\nu, \text{см}^2/\text{с}$							
5	<u>Вентиль:</u> Средняя скорость, $V = Q/\omega_{14}, \text{см/с}$							
	Показание пьезометра 14, $p_{14}/\gamma, \text{см}$							
	Показание пьезометра 15, $p_{15}/\gamma, \text{см}$							
	Потеря напора $\Delta h_{14-15}, \text{см}$							
	КМС $\xi_{14-15}$ по формуле $\xi = \frac{2g \cdot \Delta h}{V_1^2} + \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4\right]$							
$Re = V \cdot d / \nu$								
6	Кран пробковый: Средняя скорость, $V = Q/\omega_{15}, \text{см/с}$							
	Показание пьезометра 16, $p_{16}/\gamma, \text{см/с}$							



1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	Потеря напора, $\Delta h_{15-16}$ , см							
	КМС $\xi_{15-16}$ по формуле							
	$\xi = \frac{2g \cdot \Delta h}{V_1^2} + [1 - (\frac{d_1}{d_2})^4]$							
	$Re = V \cdot d / \nu$							
7	<u>Внезапное расширение</u> <u>трубопровода:</u> Средняя скорость, $V = Q/\omega_{16}$ , см/с							
	Показание пьезометра 17, $p_{17}/\gamma$ , см							
	Потеря напора, $\Delta h_{16-17}$ , см							
	КМС $\xi_{16-17}$ по формуле							
	$\xi = \frac{2g \cdot \Delta h}{V_1^2} + [1 - (\frac{d_1}{d_2})^4]$							
	$Re = V \cdot d / \nu$							
8	<u>Внезапное сужение тру-</u> <u>бопровода:</u> Средняя скорость, $V = Q/\omega_{17}$ , см /с							
	Показание пьезометра 18, $p_{18}/\gamma$ , см							
	Потеря напора, $\Delta h_{17-18}$ , см							
	КМС $\xi_{17-18}$ по формуле							
	$\xi = \frac{2g \cdot \Delta h}{V_1^2} + [1 - (\frac{d_1}{d_2})^4]$							
	$Re = V \cdot d / \nu$							

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	Колено трубы: Средняя скорость, $V = Q/\omega_{19}, \text{ см /с}$							
	Показание пьезометра 19, $p_{19}/\gamma, \text{ см}$							
	Показание пьезометра 20, $p_{20}/\gamma, \text{ см}$							
	Потеря напора, $\Delta h_{19-20}, \text{ см}$							
	КМС $\xi_{19-20}$ по формуле $\xi = \frac{2g \cdot \Delta h}{V_1^2} + [1 - (\frac{d_1}{d_2})^4]$							
	$Re = V \cdot d / \nu$							

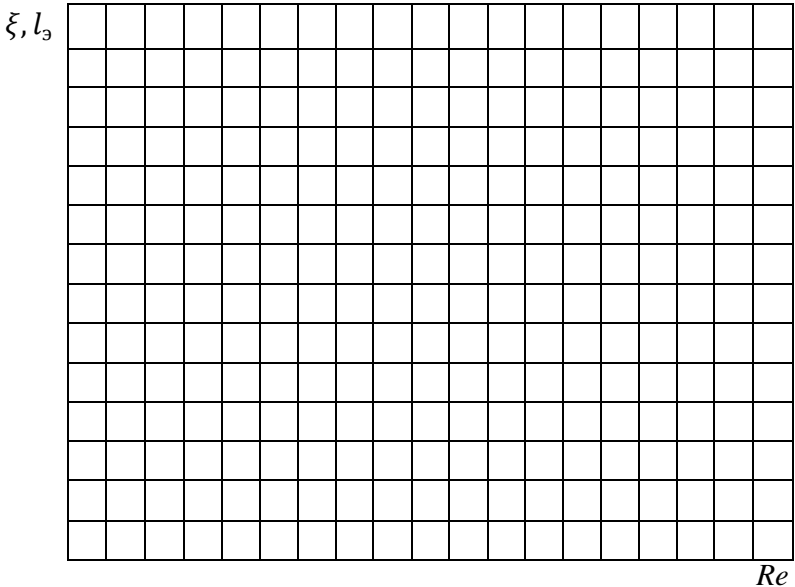


Рис. 14. Графические зависимости  $\xi = f(Re)$  и  $l_3 = f(Re)$

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

### ТАРИРОВКА РАСХОДНОЙ ШАЙБЫ

Цель работы - изучение устройств для определения расходов жидкостей и газов.

Содержание работы - тарировка расходной шайбы и практическое освоение измерения расхода жидкости.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Расходные шайбы относятся к скоростным расходомерам, которые нашли широкое применение в технике при измерении расходов жидкости. Они представляют собой элементы, создающие в потоке сужение сечения. В настоящее время стандартизированы три типа сужающих устройств: диафрагма (шайба), сопла и сопло Вентурри. Стандартные диафрагмы (шайбы) могут быть использованы в трубопроводах диаметром  $D \geq 50$  мм. Геометрическая форма стандартной диафрагмы представлена на рис. 15.

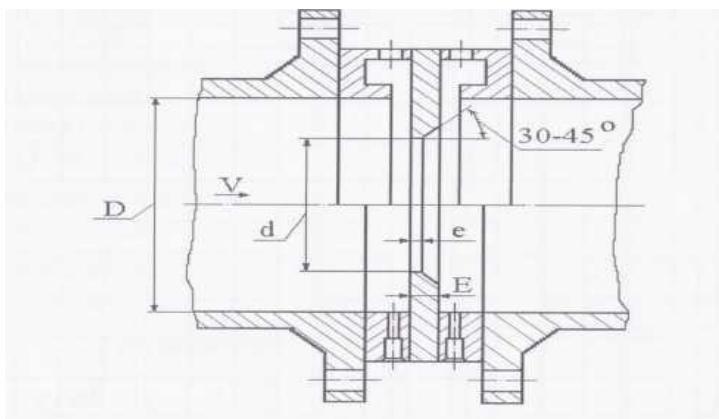


Рис. 15. Конструкция стандартной диафрагмы

Проходное отверстие диаметром  $d$  имеет цилиндрическую форму с острой прямоугольной входной кромкой без заусенцев и зубрин. Ширина цилиндрической части отверстия диафрагмы  $e$  должна лежать в пределах  $(0,005 - 0,02) D$ . Толщина диафрагмы  $E$  не должна превышать  $0,05 D$ . Диаметры трубопровода и отверстия исследуемой диафрагмы соответственно равны  $D = 1,9 \cdot 10^{-2}$  м и  $d = 10^{-2}$  м. Перед диафрагмой и после нее устанавливают пьезометры. Возникающий перепад давления на диафрагме определенным образом связан с расходом. В общем случае, с учетом реальных свойств жидкости расход определяют в соответствии с уравнением

$$Q = \mu \cdot S_2 \sqrt{\frac{2g}{1 - (S_2/S_1)^2}} \cdot \sqrt{\Delta H} ,$$

где  $\mu$  - коэффициент расхода (для воды отношение действительного расхода к теоретическому равно  $\mu = 0,648$ ), или

$$Q_{\text{теор}} = C \cdot \sqrt{\Delta H} ,$$

где  $C = \mu S_2 \cdot \sqrt{2g} / \sqrt{1 - (S_2/S_1)^2}$  - величина постоянная для данного расходомера.

Зная величину  $C$  и наблюдая за показаниями пьезометров, можно найти расход в трубопроводе для любого момента времени, причем связь между  $\Delta H$  и  $Q_{\text{ТЕОР}}$  получается параболической.

Эксперименты выполняют на приборе Д. Бернулли, схема (рис. 6) и описание которого приведены в отчете по лабораторной работе № 5. Результаты замеров и вычислений вносят в отчет в виде табл. 11 и строят графические зависимости

$$Q_{\text{ТЕОР}} = f(\Delta) \text{ и } Q = f(\Delta H).$$

Таблица 11

№ пп	Параметры	Ед. изм	Опыты				
			1	2	3	4	5
1	Показания пьезометров:						
	$P_{10}/\gamma$ $P_{11}/\gamma$	<i>см</i> <i>см</i>					
2	Разность показаний пьезометров, $\Delta H = (P_{10} - P_{11})/\gamma$	<i>см</i>					
3	Время наполнения мерного бака, $\tau$	<i>с</i>					
4	Расход, определяемый объемным способом, $Q = V / \tau$	$\frac{\text{см}^3}{\text{с}}$					
5	Показания ротаметров:						
	“Х” “У”	<i>дел.</i> <i>дел.</i>					
6	Расход, определяемый по ротаметрам (тарировочный график)	$\frac{\text{см}^3}{\text{с}}$					
7	Расход, определяемый по диафрагме, $Q = C \cdot \sqrt{\Delta H}$	$\frac{\text{см}^3}{\text{с}}$					

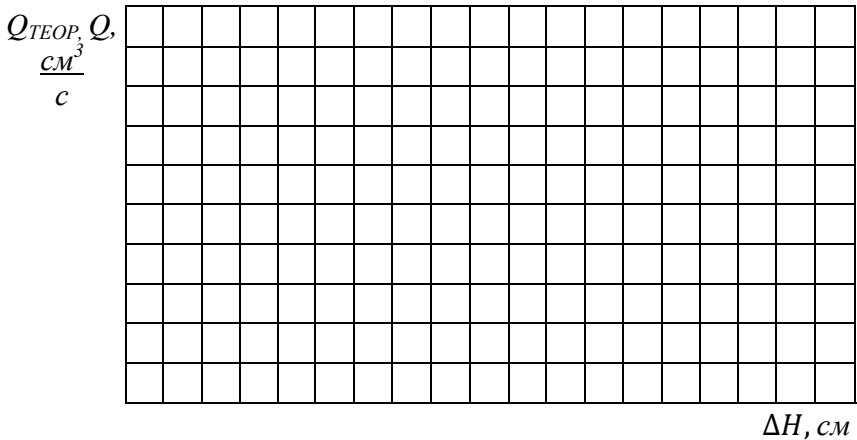


Рис. 16. Графические зависимости  $Q_{\text{ТЕОР}} = f(\Delta H)$  и  $Q = f(\Delta H)$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ткаченко, Ю.С. Гидравлика [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Ю.С. Ткаченко. – Электрон. текстовые и граф. данные. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. – Режим доступа: <http://bibl.cchgeu.ru/MarcWeb2/Found.asp>

2. Иванов, Л.А. [и др.]. Гидравлика [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Л.А. Иванов, В.М. Пачевский. 3–е изд., перераб. и доп. – Электрон. текстовые, граф. дан. – Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2008. – 158 с. – Режим доступа: <http://bibl.cchgeu.ru/MarcWeb2/Found.asp>. (Допущено УМО).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 1. Исследование вязкости жидкости.	3
Лабораторная работа № 2. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Пуазейля.....	6
Лабораторная работа № 3. Изучение режимов течения жидкости.....	9
Лабораторная работа № 4. Определение зависимости потерь на трение в трубе от режима течения жидкости.....	11
Лабораторная работа № 5. Градуировка ротаметра на приборе Д. Бернулли.....	13
Лабораторная работа № 6. Исследование гидростатического давления .....	17
Лабораторная работа № 7. Относительный покой жидкости ..	20
Лабораторная работа № 8. Экспериментальная иллюстрация уравнения Д. Бернулли. Построение напорной и пьезометрической линии.....	25
Лабораторная работа № 9. Определение коэффициента потерь на трение по длине трубопровода (коэффициента Дарси)	27
Лабораторная работа № 10. Определение коэффициента местных сопротивлений.....	31
Лабораторная работа № 11. Тарировка расходной шайбы.....	35
Библиографический список.....	38

# **ГИДРАВЛИКА**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторных работ  
для студентов направления  
подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое  
обеспечение машиностроительных производств»  
всех профилей очной и заочной форм обучения

**Составители:**  
Попова Ольга Ивановна  
Попова Маргарита Ивановна

В авторской редакции

Подписано к изданию 02.06.2022.  
Уч.-изд. л. 2,1

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»  
394006 Воронеж, 20-летия Октября, 84