

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТОН

НАВОЙСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ  
НАВОЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

«ГОРНЫЙ» ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА «ГОРНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА»

**МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

*к выполнению лабораторных работ по дисциплине:*

**«ГИДРАВЛИКА»**

Навои – 2006

Методическое пособие обсуждено на методическом Совете НГГИ и рекомендовано в печать, протокол №6 от 27.05.2006 г.

Авторы:

АТАУЛЛАЕВ О.Х.      Доцент кафедры «Горная электромеханика»,  
к.т.н.

ТОШОВ Б.Р.            Доцент кафедры «Горная электромеханика»,

АХМЕДОВ Х.            Старший преподаватель кафедры «Технология  
машиностроения».

Рецензенты:            Начальник станкостроительного цеха ПО НМЗ  
НГМК    ЮСУПОВ Б.

Декан химико-металлургического факультета  
к.т.н. доцент БАХРОНОВ Х.Ш.

*ПРЕДИСЛОВИЕ*

В данном методическом пособии подробно описываются методы выполнения и расчёта основных лабораторных работ по курсу «Гидравлика». Каждая лабораторная работа включает теоретические основы процесса, расчётные уравнения, схемы и описания лабораторных установок, а также форму записи полученных результатов.

Методическое пособие предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению: «Горное дело», «Горная электромеханика» и «Технология машиностроения, оборудование и автоматизация машиностроительных производств».

Эффективность освоения этой учебной дисциплины в значительной мере зависит от содержания и постановки лабораторного практикума.

Основная цель – научить студентов умению самостоятельно проводить лабораторные работы (с учетом правил по технике безопасности) по курсу: «Гидравлика», используя теоретические знания, полученные на лекциях.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1  
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

## НА ПРИБОРЕ РЕЙНОЛЬДСА

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Визуальное наблюдение ламинарного и турбулентного режимов движения.
2. Определение значений числа Рейнольдса при ламинарном и турбулентном режимах движения.

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

При движении жидкости в трубопроводе (канале) возможны два режима течения - ламинарный и турбулентный.

Ламинарный режим характеризуется параллельно-струйным движением, при котором отдельные слои жидкости перемещаются, не смешиваясь между собой. Такое движение возникает при малых скоростях и малых живых сечениях потока жидкости, при движении по капиллярам, при движении вязких жидкостей (нефть, мазут, масла), при движении в порах грунта и т.д.

Для турбулентного режима характерно неупорядоченное, хаотическое движение, когда частицы жидкости перемещаются по сложным, всё время изменяющимся, траекториям. Вследствие наличия в турбулентном потоке поперечных к направлению движения составляющих скорости, в жидкости происходит интенсивное перемешивание. В инженерной практике при движении воды и др. жидкостей малой вязкости (керосин, бензин, спирт и др.), в системах отопления, вентиляции, газоснабжения, теплоснабжения, водоснабжения чаще всего наблюдается турбулентный режим.

Существование двух режимов движения жидкости было наглядно показано английским физиком О. Рейнольдсом. Опыты Рейнольдса, подтверждённые позднее др. учёными, показали, что критерием для определения режима движения жидкости в круглой трубе является выражение:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu},$$

где  $Re$  - безразмерный критерий, называемый числом Рейнольдса:

$V$  - средняя скорость движения жидкости, см/с;

$d$  - диаметр трубы, см;

$\nu$  - кинематический коэффициент вязкости, см<sup>2</sup>/с.

Значение числа Рейнольдса, опыты Рейнольдса при котором происходит переход от ламинарного режима к турбулентному, называется критическим числом Рейнольдса -  $Re_{кр}$

При  $Re < Re_{кр}$  режим движения является ламинарным, при  $Re > Re_{кр}$  турбулентным.

В определенном диапазоне чисел  $Re$  существует неустойчивая область, где возможны оба режима в зависимости от характера изменения скоростей. Величина критического числа  $Re_{кр}$  зависит от ряда обстоятельств: условий входа в трубу, шероховатости стенок трубы, отсутствия или наличия первоначальных возмущений и т.д. и может принимать в каждом отдельном случае различные значения.

Для круглых труб обычно принимают  $Re_{кр} = 2320$ . Скорость, при которой турбулентный режим переходит в ламинарный режим движения жидкости, называется критической скоростью.

При  $Re \leq 2320$  – режим ламинарный.

При  $Re > 2320$  - режим турбулентный.

### ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Опытная установка (рис. 1.1) состоит из напорного бака /1/, в который по трубопроводу /2/ поступает вода из водопроводной сети. Для поддержания постоянного уровня воды в баке имеется водослив /4/. Внутри бака установлена решётка /5/, служащая для успокоения поступающей в него воды, и термометр /8/ для измерения температуры воды.

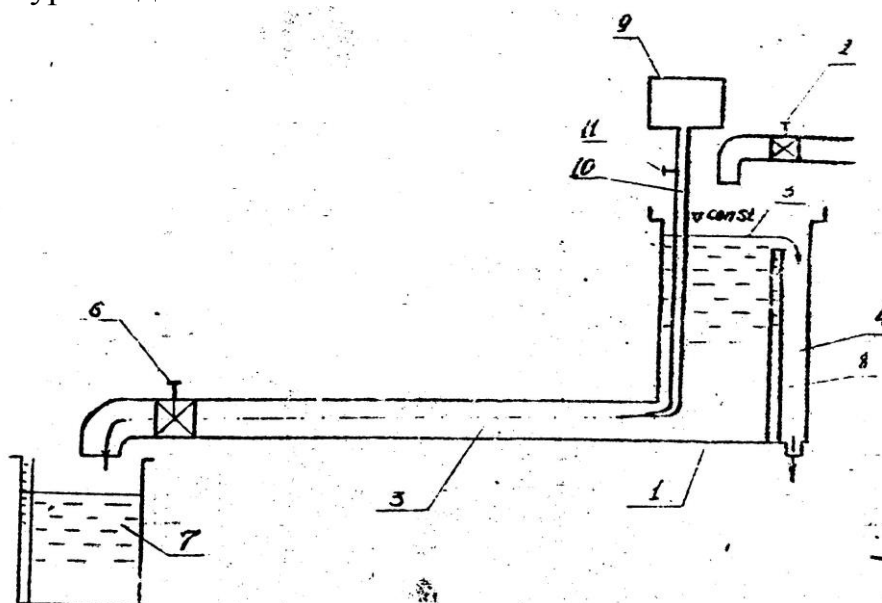


Рис.1.1. Схема опытной установки

К баку /1/ присоединена стеклянная трубка /3/, в конце которой установлен кран /6/ для регулирования скорости движения воды. Расход воды определяется с помощью мерного бака /7/.

Установка имеет небольшой бачок /9/ для красителя с трубкой /10/ и краником /11/.

В опыте режим движения наблюдается в основной стеклянной трубе /3/ при введении в основной поток красителя. Изменение режима достигается путём регулирования расхода жидкости через трубу с помощью крана /6/.

### ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

1. При закрытых краниках /6/ и /11/ заполняют напорный бак /1/ водой.
2. Незначительным открытием крана /6/ устанавливают в трубе /3/ расход жидкости, при котором имеет место медленное течение.
3. Приоткрыв кран /11/, вводят в основной поток краситель. Наблюдают характер движения жидкости в стеклянной трубе. Струйчатое движение краски будет свидетельствовать о наличии ламинарного режима. Постепенно увеличивают открытие крана /6/ и наблюдают изменение режима движения с увеличением скорости. Сначала подкрашенная струйка приобретает волнистый характер и ламинарный режим становится неустойчивым. При дальнейшем увеличении скорости цветная струйка исчезает, вся жидкость равномерно окрашивается – ламинарный режим движения перешёл в турбулентный.
4. При установившемся движении определяется расход воды в трубе. Для каждого режима движения определяется объём поступившей в мерный бак воды  $W$  за время  $t$ , одновременно регистрируется температура воды.

### ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Кинематический коэффициент вязкости  $\nu$  определяют из таблицы.

Таблица 1.1

Температура воды	0	5	10	15	20	25
------------------	---	---	----	----	----	----



в град. С <sup>0</sup>						
Кинематический коэф. вязкости $\nu$ , см <sup>2</sup> /с	0,0173	0,015	0,0131	0,0114	0,0102	0,0090

1. Расход воды:  $Q = \frac{W}{t}$   
(см<sup>3</sup>/с),  
где  $W$  – объем воды в мерном баке, см<sup>3</sup>.  
 $t$  – время заполнения бака, с.
2. Средняя скорость движения жидкости в трубе  $V = \frac{Q}{\omega}$  (см/с);  
где  $\omega$  – площадь живого сечения, трубы, см<sup>2</sup>  $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$   
 $d$  – диаметр стеклянной трубы, см.
4. По известным  $d$ ,  $\nu$ ,  $\nu$  вычисляется для каждого опыта значение числа Рейнольдса  $Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$
- Результаты измерений и вычислений заносятся в таблицу.

**Таблица 1.2**

№№	Данные измерений		Данные вычислений			Режим движения	Постоянные величины $d=2,0$ см
	W	t	Q	V	Re		
	см <sup>3</sup>	с	см <sup>3</sup> /с	см/с			
1	2	3	4	5	6	7	8

**Контрольные вопросы:**

1. Назовите основные элементы движения жидкости?
2. Что такое траектория, линия тока, элементарная струйка, поток?
3. Назовите гидравлические элементы потока?
4. Что такое расход жидкости?
5. Что такое средняя скорость потока?
6. Какие режимы наблюдается при движении жидкости в трубопроводах?

7. Чем характеризуется ламинарный режим течения?
8. Чем характеризуется турбулентный режим течения?
9. Изобразите графики распределения скоростей по сечению потока при различных режимах сечения?
10. Какой вид должен подкрашенная струйка при ламинарном режиме?
11. Какой вид имеет подкрашенная струйка при турбулентном режиме?

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Определение опытным путём значений потенциальной энергии (пьезометрического напора), удельной кинетической энергии (скоростного напора) и полной удельной энергии (гидродинамического напора) в различных сечениях потока.
2. Построение на основе опытных данных пьезометрической и напорной линий для трубопровода переменного сечения.

## КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Уравнение Бернулли для установившегося потока реальной жидкости является частным случаем закона сохранения энергии. Любой движущийся поток жидкости обладает определённой энергией. Эта энергия может быть проявлена в трех формах: в виде энергии положения, энергии давления и кинетической энергии. Соотношение между отдельными видами энергии для движущего потока устанавливается уравнением Бернулли.

Для потока реальной жидкости при установившемся движении уравнение Бернулли имеет следующий вид для двух произвольных сечений:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_w \quad (1)$$

где  $z_1, z_2$  – вертикальные координаты центров тяжести сечений;

$P_1, P_2$  – давление в центрах тяжести;

$V_1, V_2$  – средние скорости потока;

$\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты кинетической энергии, учитывающие неравномерности распределения скоростей по живому сечению потока.

В практических расчётах при турбулентном движении коэффициент кинетической энергии можно принимать равным 1,0 - 1,1.

Первый член приведённого уравнения определяет высоту положения центра тяжести живого сечения потока над произвольной горизонтальной плоскостью сравнения 0 – 0 (рис.2-1) и называется геометрической высотой или геометрическим напором; он характеризует удельную потенциальную энергию положения.

Второй член  $\frac{P}{\rho g}$  представляет собой высоту столба

жидкости, соответствующую гидродинамическому давлению в данной точке живого сечения потока и называется пьезометрической высотой, величина его характеризует удельную потенциальную энергию давления.

Сумма геометрической и пьезометрической высот  $Z + \frac{P}{\rho g}$  называется

пьезометрическим напором, величина которого определяет общий запас удельной потенциальной энергии.

Третий член уравнения  $\frac{\alpha V^2}{2g}$  называется скоростным напором,

который определяет запас удельной кинетической энергии.

Сумма  $Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g}$  представляет величину полной удельной энергии потока и называется гидродинамическим напором  $H$ .

Последний член в правой части уравнения  $h_w$  выражает суммарную потерю напора (энергии) на преодоление гидравлических сопротивлений при движении жидкости между рассматриваемыми сечениями. Изменение гидродинамического напора (полной энергии) в живых сечениях по длине потока относительно произвольно выбранной плоскости сравнения характеризуется напорной линией. Напорная линия строится по сумме трёх членов уравнения Бернулли. Так как часть полной удельной энергии затрачивается на преодоление гидравлических сопротивлений, то напорная линия может также понижаться от сечения к сечению.

Для трубопровода постоянного сечения (рис.2.1а) кинематических характеристики потока постоянны по его длине  $\alpha_1 = \alpha_2$ ,  $V_1 = V_2$ , поэтому скоростной напор имеет одинаковую величину

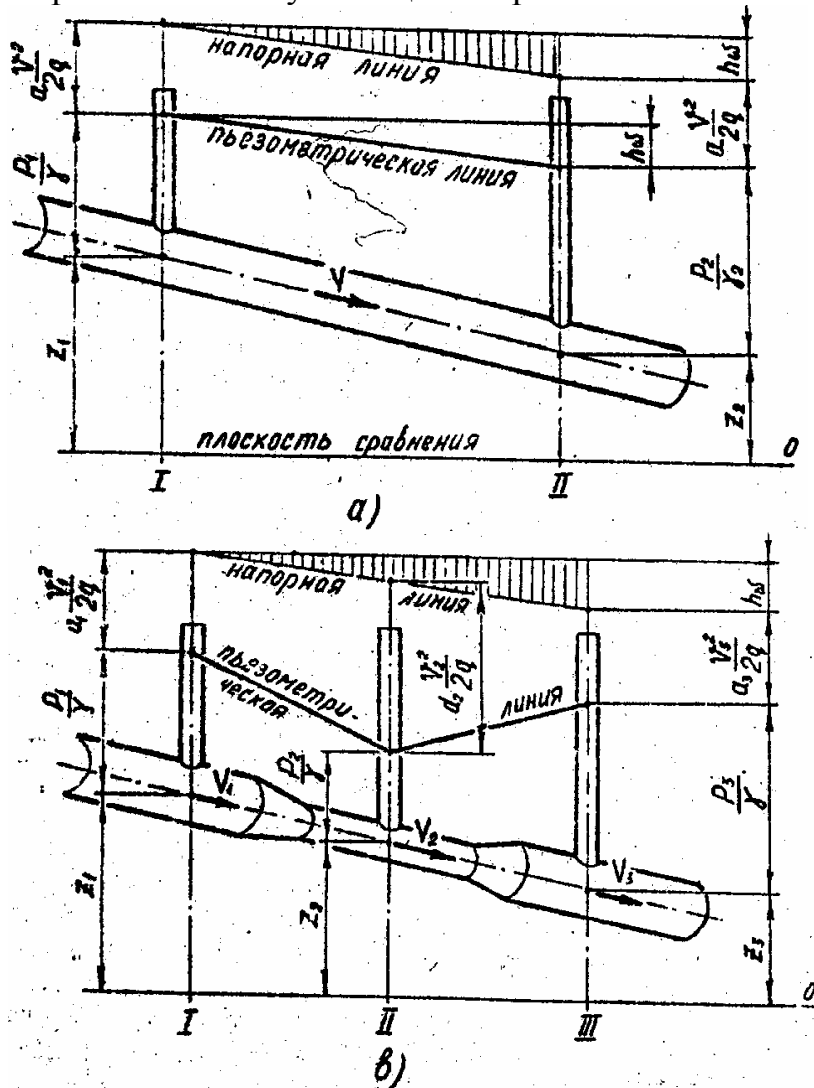
во всех сечениях  $\frac{\alpha V^2}{2g} = \text{const}$ . Тогда из уравнений Бернулли

получим:

$$h_w = \left( z_1 + \frac{P_1}{\rho g} \right) - \left( z_2 + \frac{P_2}{\rho g} \right)$$

то есть потеря напора на трение равна уменьшению удельной потенциальной энергии (пьезометрического напора) потока и выражается перепадом пьезометрических уровней начальном и конечном сечениях трубопровода.

Поскольку потери на трение пропорциональны длине участка, то напорная и пьезометрическая линии в этом случае представляют собой параллельные опускающиеся прямые.



**Рис. 2.1** График напоров в трубопроводе:  
 а) постоянного сечения  
 в) переменного сечения

В трубопроводе переменного сечения (рис.2.1 б) при движении жидкости происходит преобразование одного вида энергии жидкости в другой, которое сопровождается изменением скорости вдоль потока. Пьезометрическая линия в этом случае может понижаться (при увеличении скорости). Если живое сечение уменьшается по направлению движения, то кинетическая энергия растёт за счёт уменьшения потенциальной энергии. И наоборот, если живое сечение

потока увеличивается, то кинетическая энергия уменьшается, а потенциальная – растёт.

## ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Опытная установка для изучения уравнения Бернулли (рис.2.2) состоит из напорного бака /1/, заполняемого из водопроводной сети через кран /5/, трубопровода с горизонтальной осью /2/ переменного сечения с диаметрами  $D$  и  $d$  и мерного бака /7/. Постоянный горизонт воды в баке поддерживается с помощью водослива /4/. Благодаря постоянству уровня в баке /1/ движение жидкости в трубе будет установившимся. В шести характерных сечениях трубопровода установлены пьезометры /3/, нуль шкалы которых совпадает с осью трубы. По показаниям пьезометров определяются пьезометрические напоры в сечениях I – VI. Регулирование расхода через трубу производится краном /6/. Расход определяется объёмным способом по уровню воды в мерном баке.

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

1. Напорный бак /1/ заполняется водой.
2. Проверяется отсутствие воздуха в пьезометрах.
3. При некотором открытии крана /6/ добиваются установившегося движения жидкости в трубе, свидетельством чего является неизменность уровня воды в пьезометрах.
4. Для данного режима движения замеряют объём жидкости  $W$ , поступивший в мерный бак /7/ за время опыта  $t$  /
5. Одновременно с замером объёма жидкости снимают показания пьезометров /3/.
6. Результаты замеров заносятся в таблицу 2.1.

Вертикальное расстояние  $z$  от оси трубопровода до плоскости сравнения принимают в расчётах  $z=0,7$  м.

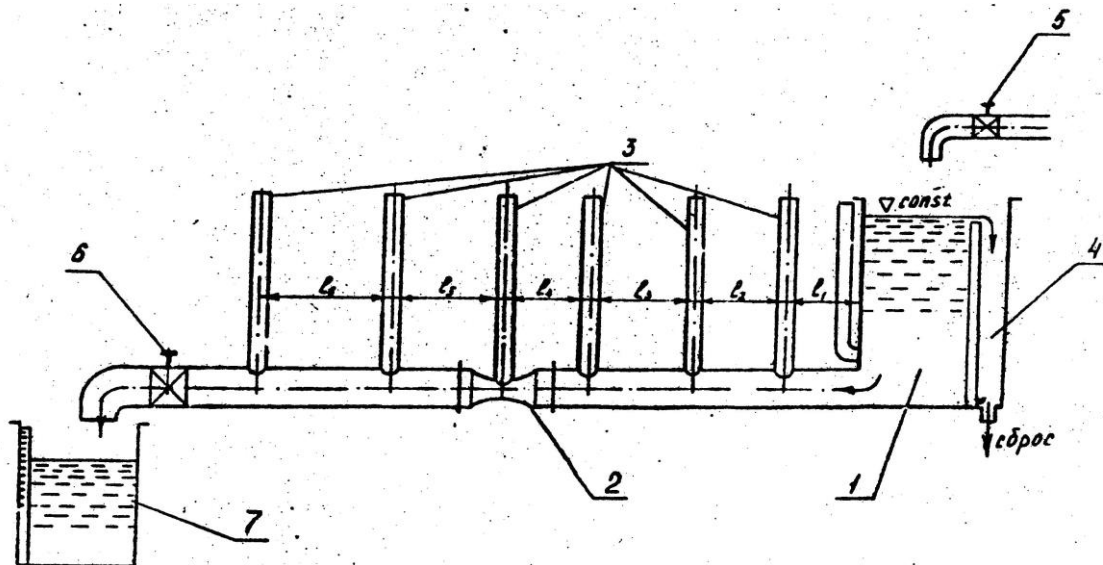


Рис.2.2 Схема опытной установки

Таблица 2.1.

№№	Показания пьезометров						W	t	Постоянные величины D=2,0 см, d=1,0 см z=0,7 м, L=1,0
	$\frac{P_1}{\rho q}$	$\frac{P_2}{\rho q}$	$\frac{P_3}{\rho q}$	$\frac{P_4}{\rho q}$	$\frac{P_5}{\rho q}$	$\frac{P_6}{\rho q}$			
	см	см	см	см	см	см	см <sup>3</sup>	с	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Таблица 2.2

№№	Показатели	Единицы измерений	Номера живых сечений				
			I	II	III	IV	V
1	2	3	4	5	6	7	8
			9				
1.	Диаметр трубы	см					
2.	Живое сечение	см <sup>2</sup>					
3.	Средняя скорость	см/с					
4.	Удельная кинематическая энергия	см					
5.	Удельная потенциальная энергия	см					
6.	Полная удельная энергия	см					
7.	Потери напора	см					

## ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

- |  |  |
|--|--|
| <p>1. Расход жидкости<br/>(см<sup>3</sup>/с)</p>   | $Q = \frac{W}{t}$  |
| <p>2. Средние скорости в каждом сечении потока:<br/>(см/с)</p>   | $V = \frac{Q}{\omega}$                                   |
| <p>Где <math>\omega</math> – площадь живого сечения трубопровода<br/>(см<sup>2</sup>)</p>  | $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$                             |
| <p>3. Удельная потенциальная энергия<br/>(см)</p>  | $E_{\text{п}} = Z + \frac{P}{\rho g}$                    |
| <p>4. Удельная кинетическая энергия</p>  | $E_{\text{к}} = \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (\text{см})$ |
| <p>5. Полная удельная энергия<br/>(см)</p>   | $Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g}$           |
| <p>6. Потери энергии<br/>где <math>E_1</math> – полная удельная энергия в 1 - ом сечении,<br/><math>E_i</math> - полная удельная энергия в i - ом сечении.</p> | $h_w = E_1 - E_i$  |

### Контрольные вопросы

1. Что такое установившееся движения жидкости. Назовите другие виды движения и дайте их характеристику?
2. Какой основной смысл уравнения неразрывности?
3. Какой смысл уравнения Д. Бернулли?
4. Условия применения Д. Бернулли?
5. Что такое гидродинамический напор?
6. Что такое пьезометрический напор?
7. Как изменяется пьезометрический и гидравлический уклоны по длине потока?
8. Что такое потери напора?



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ТАРИРОВАНИЕ РАСХОДОМЕРА ВЕНТУРИ

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Освоение методики измерения расхода воды трубой Вентури
2. Тарировка расходомера и построение тарировочного графика

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для измерения расхода жидкости (газа), равномерно движущего в напорном трубопроводе, используют специальные устройства – сопла, диафрагмы, трубы Вентури.

Применение этих устройств основано на существовании определённой зависимости между перепадом давления (создаваемым в потоке в результате сужения проходного сечения трубы) и расходом жидкости. Для каждого конкретного сужающего устройства эта зависимость может быть найдена из основных уравнений гидравлики: уравнения Бернулли и уравнения неразрывности потока.

Расходомер Вентури представляет собой трубу переменного сечения, состоящую из двух участков – плавно сужающегося и постепенно расширяющегося. Скорость потока в суженном месте возрастает, а давление падает. Возникает разность (перепад) давлений, которая измеряется парой пьезометров, устанавливаемых в начале конуса и на цилиндрическом участке.

Теоретический расход жидкости в трубопроводе может быть определен по формуле:

$$Q = V_4 \omega_4 = \sqrt{\frac{2gh}{1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}}} \cdot \omega_4$$

где 
$$\Delta h = \frac{P_3}{\rho g} - \frac{P_4}{\rho g}$$

или 
$$Q = C \sqrt{\Delta h}$$

где  $C$ -величина, постоянная для данного расходомера и равная

$$C = \sqrt{\frac{2g}{1 - \frac{\omega_4}{\omega_3}}} \cdot \omega_4$$

Зная величину  $C$  и наблюдая за показаниями пьезометров, можно определить расход в трубопровода для любого момента времени по формуле:

$$Q = C\sqrt{\Delta h}$$

Для стандартных расходомеров коэффициенты сопротивлений и постоянные расходомеров приводятся в специальных справочниках. Константу  $C$  также можно подсчитать теоретически, но точнее она определяется из эксперимента, т. е. в результате тарировки расходомера. При тарировании результаты опытов удобно представить в виде графика зависимости

$$\Delta h = f(Q).$$

В этом случае можно определять расход непосредственно по графику, не прибегая к расчётам.

### Труба Вентури

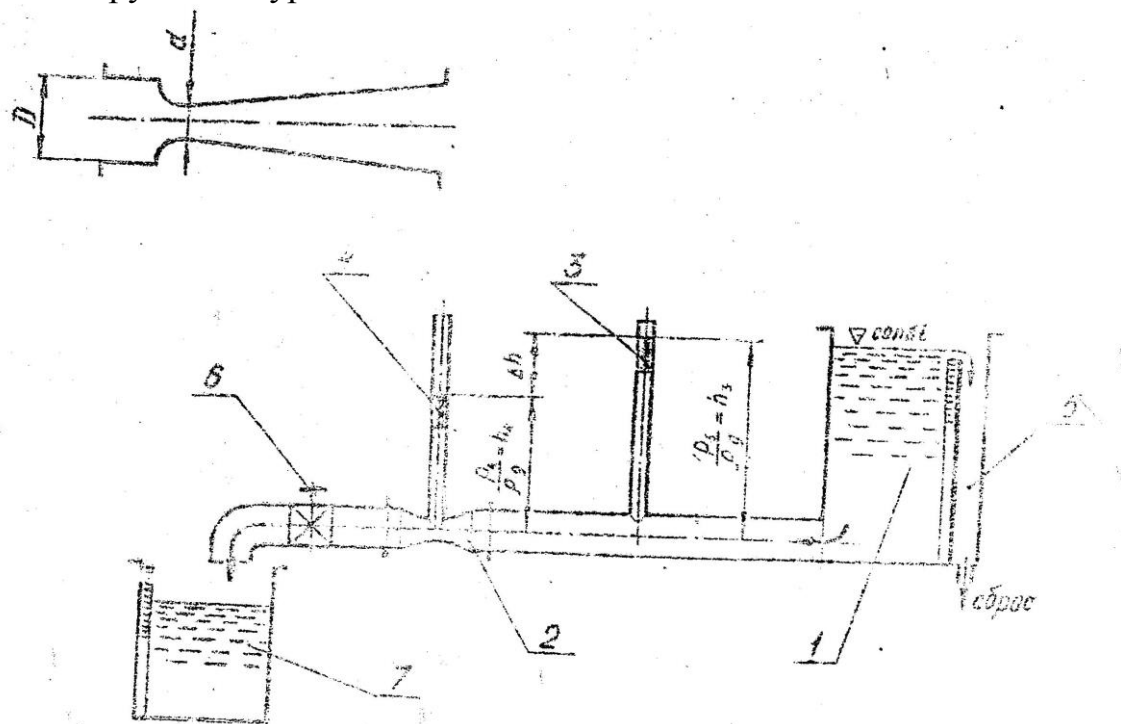


Рис. 3.1. Схема установки для тарирования расходомера Вентури

## ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ.

Установка (рис.3.1) включает: напорный бак /1/, трубопровод /2/, в конце которого установлен кран /6/, мерный бак /7/. В средней части трубопровода смонтирована труба Вентури. Для замера перепада давления к расходомеру присоединены пьезометры /3/ и /4/. Постоянный напор в баке поддерживается с помощью водослива /5/.

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ.

1. Напорный бак /1/ заполняется водой.
2. Проверяется отсутствие воздуха в пьезометрах.
3. С помощью вентиля /6/ в трубопроводе устанавливаются разные расходы воды и для каждого опыта измеряются показания пьезометров.

$$h_3 = \frac{P_3}{\rho g};$$

$$h_4 = \frac{P_4}{\rho g};$$

Всего проводят не менее 5 замеров.

4. Одновременно определяется количество поступившей в мерный бак воды  $W$  за время опыта  $t$ .  
Данные измерений заносятся в таблицу 3.1.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ.

1. Вычисляется действительный расход жидкости

$$Q = \frac{W}{t} \text{ (см}^3\text{/с)}$$

2. Определяется разность показаний пьезометров /3/ и /4/

$$\Delta h = h_3 - h_4$$

3. Вычисляется постоянная расходомера

$$C = \frac{Q}{\sqrt{\Delta h}}$$

4. По результатам опытов строится тарировочный график

$$\Delta h = f(Q).$$

Результаты вычислений заносятся в таблицу .

**Таблица 3.1**

№№	Данные измерений				Расчёты			
	W	t	h <sub>3</sub>	h <sub>4</sub>	Q	Δh	C	C <sub>ср</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9

По результатам опытов строится тарировочный график  $\Delta h = f(Q)$ .

Контрольные вопросы:

1. Для каких потоков применяется трубка Вентури для измерения расхода жидкости.
2. Что себе представляет расходомер Вентури?

Каким способом определяется постоянные коэффициенты для данного расходомера?

## ЛАБОРОТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ ПО ДЛИНЕ

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ.

1. Определение опытным путем коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  для различных режимов движения жидкости.
2. Определения области сопротивления, выбор расчётных формул для вычисления величины коэффициентов гидравлического трения в зависимости от режима движения жидкости.
3. Сравнение результатов экспериментального определения коэффициентов гидравлического трения с вычисленными по расчётным формулам.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Равномерно движущийся в трубе поток жидкости теряет часть энергии вследствие трения о поверхности трубы, а также внутреннего трения в самой жидкости. Эти потери носят название потерь напора на трение по длине потока.

В соответствии с уравнением Бернулли потери напора по длине определяются как разность полных удельных энергий в двух сечениях рассматриваемого участка трубопровода и для горизонтальной трубы постоянного диаметра могут быть выражены в виде:

$$h_e = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} \quad (1)$$

где  $\frac{P_1}{\rho g}$  и  $\frac{P_2}{\rho g}$  - пьезометрические напоры в соответствующих сечениях потока.

Уравнение (1) является основным при опытном определении потерь напора на трение.

Для расчета потерь напора на трение при движении жидкости по трубам пользуется формулой Дарси-Вейсбеха:

$$h_e = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  
 $V$  – средняя скорость движения жидкости;  
 $l$  – длина трубопровода;  
 $d$  – диаметр трубопровода;  
 $g$  - ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ,

Формула (2) справедлива для различных режимов движения жидкости. Однако значения коэффициентов  $\lambda$  для ламинарного и турбулентного режимов будут различны и в общем случае  $\lambda$  будет также зависеть от относительной шероховатости стенок трубы, то есть

$$\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{\Delta}{d}\right)$$

где  $\Delta$  - абсолютный размер выступов шероховатости.

Коэффициент  $\lambda$  определяется на основе опытных данных или по известным эмпирическим зависимостям. Опытом установлено, что при ламинарном течении шероховатость не оказывает влияния на сопротивление движению. Коэффициент  $\lambda$  в этом случае зависит только от числа Рейнольдса и может быть вычислен по формуле

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (3)$$

Потери напора при ламинарном потоке пропорциональны скорости в первой степени:  $h_e = kV$

В турбулентном потоке у стенок образуется тонкий слой жидкости с ламинарным режимом. Основная масса жидкости (ядро потока), в котором движение турбулентное, связан с этим слоем переходной зоной. Совокупность ламинарного слоя и переходной зоны называют пограничным слоем. Толщина пограничного слоя измеряется долями мм, обозначается  $\delta$  и зависит от числа Рейнольдса.

Пока средняя величина выступов, образующих шероховатости поверхности трубы (абсолютная эквивалентная шероховатость  $\Delta$ , меньше толщины пограничного слоя  $\Delta < \delta$ ), турбулентный поток не входит в непосредственный контакт с выступами, шероховатость не влияет на величину потерь напора. Такие поверхности называются гидравлически гладкими.

С увеличением  $Re$  толщина пограничного слоя уменьшается и становится меньше выступов шероховатости ( $\Delta > \delta$ ). Выступа входят в турбулентное ядро потока и увеличивает потери напора. Такие поверхности называют гидравлически шероховатыми.

Для характеристики влияния шероховатости на величину потерь вводится понятие эквивалентной относительной шероховатости

$$\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{d},$$

где  $d$ - диаметр трубы.

Зависимость коэффициента гидравлического трения от шероховатости и  $Re$  для труб с естественной шероховатостью (технические трубы) представлена на рис. 4.1 (график Никурадзе).

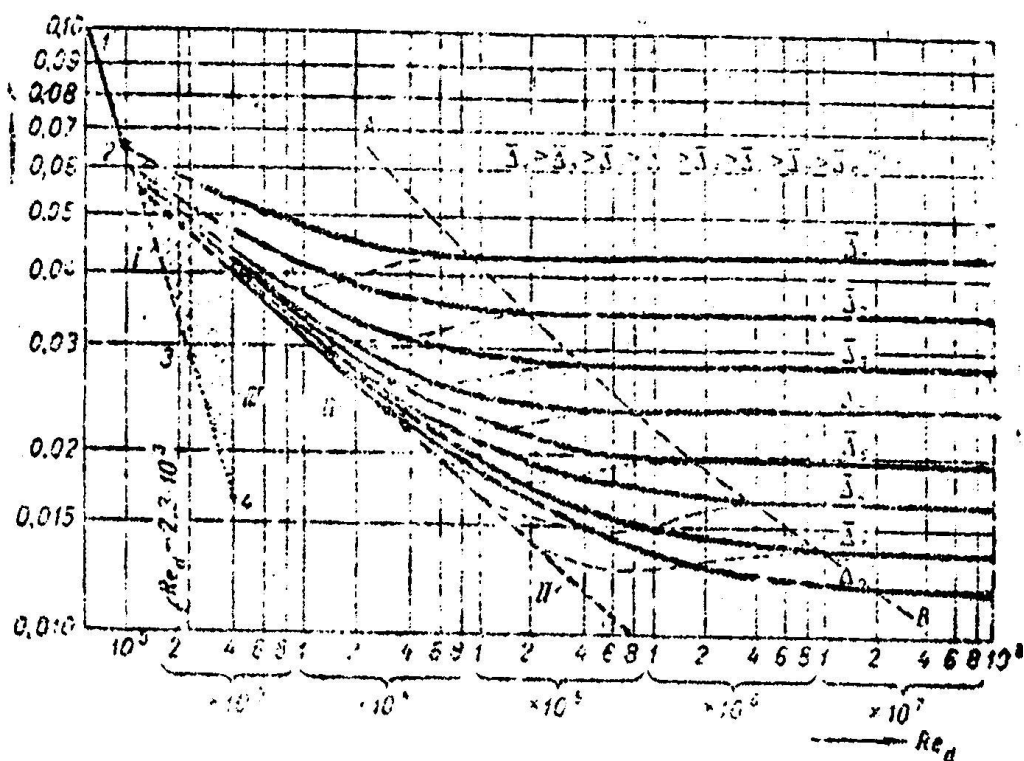


Рис. 4.1 График Никурадзе

Первая зона – зона ламинарного режима, она представлена прямой 1-2-3 (смотри формулу (3)).

Вторая зона – зона, покрытая наклонной штриховкой, является зоной неустойчивого режима. Здесь числа Рейнольдса лежат в пределах от 1000 -2300 до 4000.

Третья зона – зона турбулентного режима. Эта зона располагается правая вертикали III, отвечающей  $Re=4000$ . Данная зона в свою очередь разбивается на три области сопротивления:

- 1) Область гидравлически гладких труб – прямая с постепенным переходом в кривую для относительной шероховатости  $\Delta=0,000005$  при  $Re=10^5$ . В этой области  $\lambda$  зависит только от числа Рейнольдса и определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}$$

- 2) Область квадратичного сопротивления на графике располагается между линиями I и II. Для определения используется формула Альтшуля:

$$\lambda = 0,11\left(\bar{\Delta} + \frac{68}{\text{Re}}\right)^{0,25}$$

- 3) Область квадратичного сопротивления (автомодельная) на графике эта область располагается правее линии II. В этой области потери напора на трение пропорциональны и коэффициент гидравлического трения вычисляется по формуле Шифринсона:

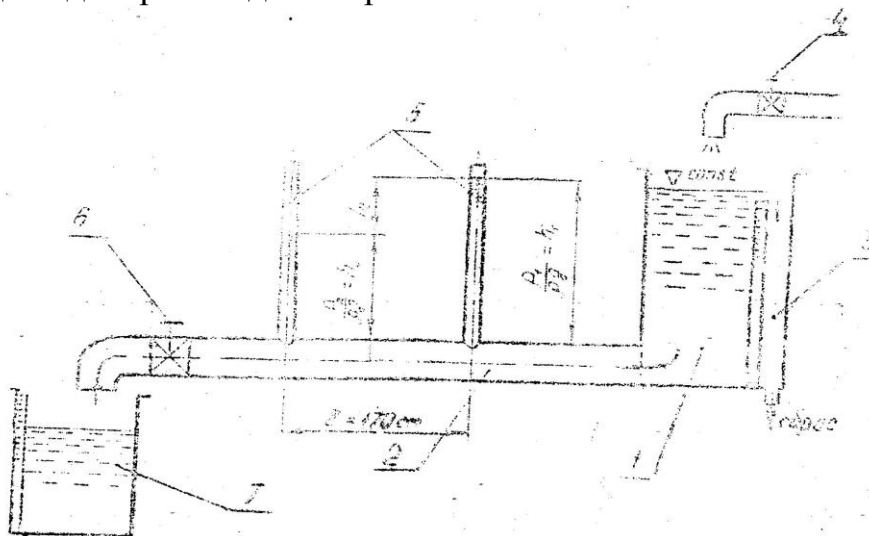
$$\lambda = 0,11(\bar{\Delta})^{0,25}$$

Всё изложенное выше удобно обобщить в таблице 4.1

#### ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Опытная установка (рис.4.2) состоит из бака /1/ от которого отходит трубопровод /2/ диаметром  $d=2,5$  см. Трубопровод имеет прямолинейный участок длиной  $l = 170$  см. В начале и конце участка установлены пьезометры /5/.

В баке установлен водослив /3/, поддерживающий постоянный напор. В конце трубы установлен мерный бак /7/. Регулирование расхода воды производится кранами /4/ и /6/.



**Рис. 4.2** Схема установки для определения потерь напора по длине трубы



## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

1. Напорный бак заполняется водой до постоянного уровня.
2. Открытием вентиля /6/ в трубопроводе устанавливается режим течения, соответствующий минимальному в опыте расходу жидкости. Рекомендуется провести опыты не менее трех раз при разных открытиях крана /6/.
3. Для каждого режима определяется:  
А) объем, поступивший в мерный бак  $W$  за время опыта  $t$ .  
Б) Показания пьезометров  $h_1$  и  $h_2$ .

## ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Потеря напора на выделенном участке определяется из уравнения Бернулли, составленного для сечений 1-1 и 2-2.

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_e$$

$$\text{т.к. } z_1=z_2, \quad V_1=V_2, \quad h_l = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}$$

2. Расход и скорость средняя, движения жидкости в трубопроводе.

$$Q=W/t \quad (\text{см}^3/\text{с}),$$

$$V=Q/\omega \quad (\text{см}/\text{с}).$$

3. Для определения коэффициента сопротивления  $\lambda$  применяется формула Дарси-Вейсбаха:

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

4. Для определения области сопротивления подчитываются числа  $Re$

$$Re = \frac{Vd}{\nu}$$

5. В зависимости области сопротивления выбирается формула для определения теоретического значения коэффициента гидравлического трения по длине.
6. Результаты замеров и расчетов заносятся в таблицу 4.2.

Таблица 4.1

Режим	Турбулентный		
	Гидравлически гладких труб	До квадратичного сопротивления	Квадратичного сопротивления
Общая зависимость коэффициент гидравлического трения	$\lambda = f(Re)$	$\lambda = f(Re, \bar{\Delta})$	$\lambda = f(\bar{\Delta})$
Критерий определения области сопротивления	$Re < Re'_{кр} = \frac{20}{\Delta}$	$Re'_{кр} < Re < Re''_{кр}$	$Re > Re_{кр} = \frac{500}{\Delta}$
Пример расчетной формулы	$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$	$\lambda = 0,11(\bar{\Delta} + \frac{68}{Re})^{0,25}$	$\lambda = 0,11(\bar{\Delta})^{0,25}$

Таблица 4.2

№	Определение потерь напора по длине			Определение средней скорости				Определение коэффициент гидравлического трения			
	$\frac{P_1}{\rho g}$	$\frac{P_2}{\rho g}$	$h_e$	W	t	Q	V	$\lambda_{сп}$	Re	Обл. сопр.	$\lambda_T$
	см	см	см	см <sup>3</sup>	с	см <sup>3</sup> /с	см/с				

Контрольные вопросы:

1. Как определяется потери напора по длине трубопровода с помощью уравнение Д.Бернулли?
2. Приведите формулу потери напора по длине для горизонтального трубопровода с постоянным диаметром?
3. Запишите формулу Дарси - Вейсбаха и покажите область применимость этих формул?
4. Покажите значения коэффициента гидравлического трения для различных режимов движения жидкости?

## ЛАБОРОТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ.

1. Определить опытным путём значения коэффициентов местных сопротивлений.
2. Сравнить полученные значения коэффициентов с результатами вычислений по теоретическим формулам или приведёнными в справочниках.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.

Одним из важнейших вопросов прикладной гидравлики является определение потерь энергии при движении жидкостей. Частным случаем потери энергии при движении жидкости по трубопроводу является потеря энергии в местных сопротивлениях.

Местные гидравлические сопротивления – это такие элементы трубопроводов, в которых вследствие изменения размеров или конфигурации русла происходит изменение скорости потока, отрыв транзитной струи от стенок русла и возникает вихреобразование. Местные сопротивления встречаются во всех гидравлических системах. Чаще всего это различная запорная арматура (краны, задвижки и т.д.), расширение и сужение сечений потока, повороты, колена и др.

Потери энергий в конечном счёте обусловлены вязкостью жидкости, а следовательно, теряемая механическая энергия рассеивается и переходит в тепловую.

Для вычисления потерь напора, вызванных местными сопротивлениями, используют формулу:

$$h_m = \xi \frac{V^2}{2g},$$

где  $h_m$  – потеря напора на местное сопротивление, см;  
 $V$  – средняя скорость движения потока, см/с;  
 $\xi$  – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент местного сопротивления существенно зависит от вида местного сопротивления, его геометрической формы, скорости течения жидкости, её плотности, вязкости, а также от диаметра трубы, по которой движется поток. Этот коэффициент обычно определяют опытным путём.

1. Для резкого расширения потока (рис. 5 а) величина потерь напора может быть получена теоретически по формуле Борда:

$$h_{pp} = \frac{V_d - V_D}{2g}$$

где  $h_{pp}$  - потеря напора при резком расширении, см;  
 $V_d$  - средняя скорость движения жидкости до расширения, см/с;  
 $V_D$  - то же после расширения.

После преобразования эта формула имеет вид:  $h_{pp} = \xi_{pp} \frac{V^2}{2g}$

где -  $\xi = \left(\frac{\omega_D}{\omega_d} - 1\right)^2$

$\omega_d$  - площадь живого сечения до расширения, см<sup>2</sup>;  
 $\omega_D$  - площадь живого сечения после расширения.

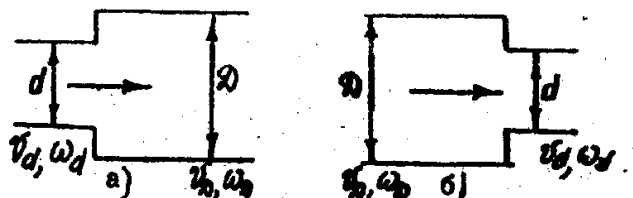


Рис. 5.

2. Для резкого сужения потока (рис.4)

$$h_{pc} = \xi_{pc} \frac{V^2}{2g}$$

Значение коэффициента местного сопротивления при резком сужении теоретически определяется по формуле

$$\xi_{pc} = 0.5 \left(1 - \frac{\omega_D}{\omega_d}\right)$$

3. Для пробкового крана коэффициент местного сопротивления зависит от его конструкции и степени открытия. Значения коэффициентов  $\xi_{кр}$  в зависимости от угла поворота пробкового крана приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Угол поворота	5	10	20	30	40	50	60	65
Коэф. сопр.	0,05	0,029	1,56	5,47	17,3	52,6	206	485

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Опытная установка (рис.5.1) состоит из бака /1/, от которого отходит труба /2/. Уровень воды в баке поддерживается постоянным с помощью водослива. На трубопроводе находятся местные сопротивления в виде резкого расширения /5/, резкого сужения /6/, крана /7/. До и после каждого местного сопротивления установлены пьезометры /3/. В конце трубопровода устанавливается мерный бак /4/

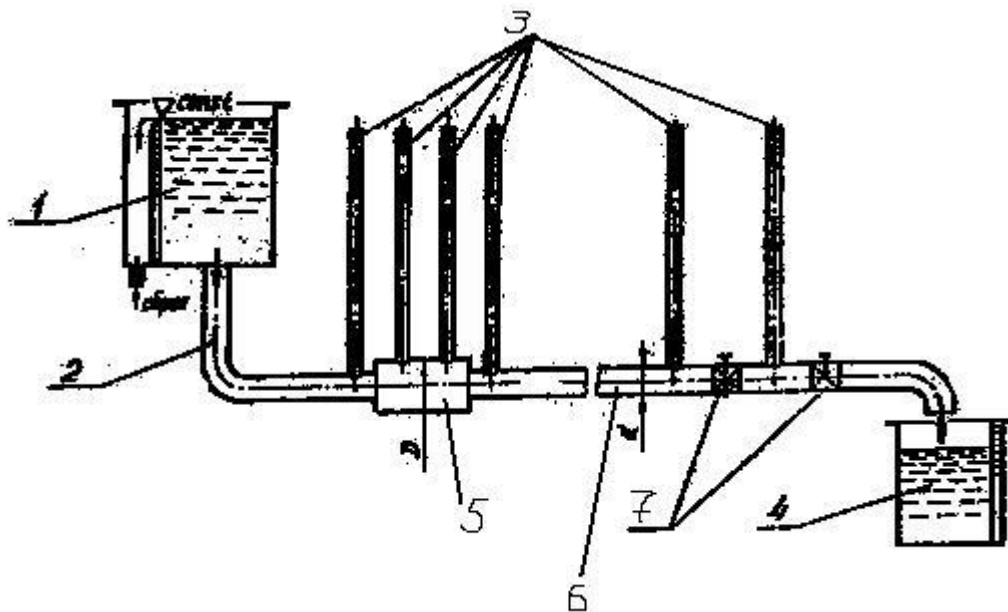


Рис. 5.1 Схема установки для исследования местных сопротивлений

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

При открытии крана /7/ устанавливают расход жидкости в трубопроводе. По достижении установившегося движения жидкости до и после местного сопротивления измеряют пьезометрический напор, а также определяют объем воды в мерном баке /4/ и время его наполнения. Результаты записывают в таблицу. Опыты проводят не менее трёх раз при различном расходе жидкости, который регулируют краном /7/.

## ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ.

Расход воды и среднюю скорость ее движения определяют следующим способом:

$$Q = \frac{W}{t}, V_d = \frac{Q}{\omega_d}; V_D = \frac{Q}{\omega_D},$$

где 
$$\omega_d = \frac{\pi d^2}{4}, \omega_D = \frac{\pi D^2}{4}$$

Здесь  $d$  – диаметр трубопровода до расширения;  
 $D$  – то же самое после расширения.

Затем определяют потери напора в местных сопротивлениях.  
 Для этого применяют уравнение Бернулли:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}}$$

$z_1 = z_2$  так как трубопровод горизонтальный, то

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}}$$

Потери напора между сечениями:  $h_{w_{1-2}} = h_l + h_m$

где  $h_l$  – потери напора по длине;

$h_m$  – то же на местное сопротивление.

Так как потери по длине очень малы, то

$$h_{w_{1-2}} = h_m = \left( \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left( \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right)$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 10 \quad h_m = E_1 - E_2$$

здесь  $E = \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g}$  – полная удельная энергия потока.

Поскольку для крана  $V_1 = V_2 = V_d$ , то  $h_{кр} = \frac{P_5}{\rho g} + \frac{P_6}{\rho g}$

Потери напора при расширениях и сужении трубопровода определяются разностью полных удельных энергий до местного сопротивления и после.

$$h_{p.p} = E_1 - E_2 = \left( \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_d^2}{2g} \right) - \left( \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_d^2}{2g} \right)$$

$$h_{pc} = E_3 - E_4 = \left( \frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_D^2}{2g} \right) - \left( \frac{P_4}{\rho g} + \frac{V_d^2}{2g} \right)$$

Производят расчёт опытных значений коэффициентов местных сопротивлений по формуле:

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

Рассчитывают теоретические значения коэффициентов местных сопротивлений и сравнивают с опытными. Результаты заносят в таблицу.

**Таблица 5.2**

№	Показания пьезометров						W	T	Постоянные величины d=2 см; D=50 см
	Резкое расш.		Резкое суж.		кран				
	$\frac{P_1}{\rho g}$	$\frac{P_2}{\rho g}$	$\frac{P_3}{\rho g}$	$\frac{P_4}{\rho g}$	$\frac{P_5}{\rho g}$	$\frac{P_6}{\rho g}$			
	см	см	см	см	см	см	см <sup>3</sup>	с	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

**Таблица 5.3**

№	Q	V <sub>d</sub>	V <sub>D</sub>	h <sub>pp</sub>	h <sub>pc</sub>	h <sub>кр</sub>	ξ <sub>pp</sub>	ξ <sub>рк</sub>	ξ <sub>кр</sub>	ξ <sub>ppт</sub>	ξ <sub>pcт</sub>	ξ <sub>крт</sub>
	см <sup>3</sup> /с	см/с	см/с	см	см	см						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

### Контрольные вопросы

1. Что такое местные гидравлические сопротивления?
2. Что такое запорная арматура?
3. Приведите формулу определения потери напора вызванных местными сопротивлениями?
4. Приведите формулу Бордо и объясните область применимости этих формул?

### ЛАБОРОТОРНАЯ РАБОТА № 6

#### ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ МАЛОЕ ОТВЕРСТИЕ В ТОНКОЙ СТЕНКЕ.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать характеристики истечения, определить опытным путем значения коэффициентом сжатия  $E$ , скорости  $\varphi$ , местного сопротивления  $\xi$ , расхода  $\mu$ , характеризующих истечений жидкости через малое отверстие в тонкой стенке (рис.6.1 а).

## КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.

Отверстие считается малым, если диаметр его  $d \leq 0.1H$ ,  
где  $H$  - напор над центром отверстия.

Тонкой стенкой считается такая, толщина которой  $\delta < 3d_{\text{отв}}$  не влияет на характер истечения жидкости из отверстия, а также стенка, края которой в отверстии имеют острую кромку.

Вследствие того, что жидкость подходит к круглому отверстию со всех сторон, линии тока в начале струи оказываются криволинейными и, пройдя плоскость отверстия, продолжает приближаться к оси струи. По этой причине струя на выходе из отверстия сжимается и на расстоянии, разном  $(0,5 \div 0,1) d_{\text{отв}}$ , приобретает сжатие, это сечение называется сжатым сечением (рис.6.1б).

Степень сжатия струи определяется коэффициентом сжатия

$$\varepsilon = \frac{\omega_{\text{сж}}}{\omega}$$

где  $\omega_{\text{сж}}$ -площадь сжатого сечения,  
 $\omega$  – площадь отверстия.

Средняя скорость в сжатом сечении струи определяется по формуле.

$$V = \varphi \sqrt{2gH}, \quad \varphi = \sqrt{\frac{1}{\alpha + \xi j}}$$

где  $\varphi$ – коэффициент скорости, учитывающий уменьшение теоретического значения скорости  $V_T = \varphi \sqrt{2gH}$  вследствие



наличия сопротивлений при истечении и представляет собой отношение действительной скорости к теоретической  $\varphi = \frac{V}{V_T}$ ;

$\xi_j$ - коэффициент местного сопротивления,  
 $\alpha$ - коэффициент Кориолиса в сжатом сечений,  $\alpha=1.0$

Действительная скорость  $V$  определяется из уравнения траектории

падения струи, (параболы).  $V = X \sqrt{\frac{y}{2Y}}$ ,

«X» и «Y» - координаты произвольных точек струи относительно начала координат, совпадающего с центром тяжести сжатого сечения. Зная коэффициент скорости  $\varphi$ , можно определить коэффициент местного сопротивления.

$$\xi_j = \frac{1}{\varphi^2} - 1$$

Расход жидкости через малое отверстие в тонкой стенке

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2gH},$$

где  $\omega$  - площадь отверстия,  
 $\mu$  - коэффициент расхода равный отношению действительного расхода к расходу теоретическому, т.е. полученному без учета сопротивления и сжатия струи:

$$\mu = \frac{Q}{Q_T} \text{ или } \mu = \varepsilon \cdot \varphi$$

где  $Q_T = \omega \cdot \sqrt{2gH}$

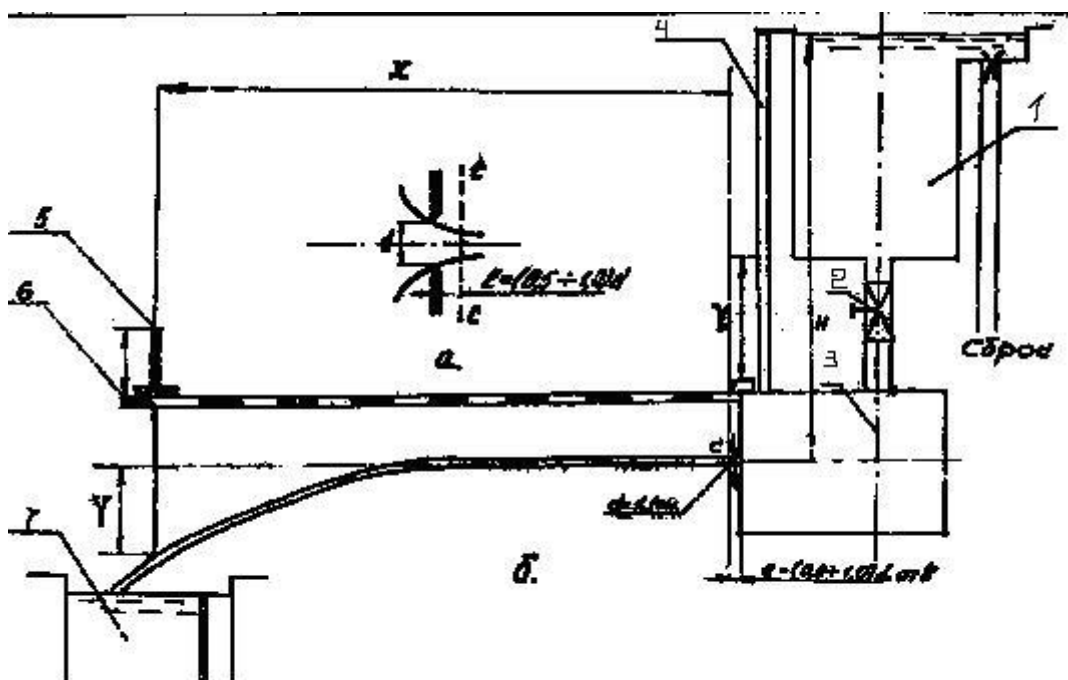
По данным опытов для малых отверстий в тонкой стенке при совершенном сжатии.

$\varepsilon = 0.64$ ;  $\xi_j = 0.06$ ;  $\varphi = 0.95$ ;  $\mu = 0.62$ .

ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ.

Опытная установка (рис.6.1а) состоит из напорного бака /1/, в котором поддерживается постоянный уровень с помощью водослива. Напорный бак соединен вертикальной трубой с баком меньшего объема /3/, в стенке которого имеется отверстия  $d_{отв}=1,1$  см с острыми кромками. Напор над центром отверстия измеряется пьезометром /4/. Меняя открытия крана /2/, устанавливают различные напоры над центром отверстия.

Для определения действительной скорости замеряют координаты падающей струи. Для определения горизонтальной координаты «Х» установлена рейка с делениями /5/. При помощи шпитценмасштаба /6/ определяется вертикальная координата струи «У». Объем воды замеряется мерным сосудом /7/.



**Рис. 6.1** Схема опытной установки

Определения коэффициента сжатия струи

**Таблица 6.1**

№	$d_{сж}$	$\omega_{сж}$	$\varepsilon$	$\varepsilon_{ср}$	Постоянная величина
	см	см <sup>2</sup>			
1	2	3	4	5	6
1. 2.					d=11

Определение коэффициента расхода

**Таблица 6.2**

№	H	W	t	Q	Q <sub>T</sub>	μ	μ <sub>ср</sub>
	См	см <sup>3</sup>	сек	см <sup>3</sup> /сек	см <sup>3</sup> /сек		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.							
2.							

Определения коэффициента скорости и гидравлических сопротивлений.

**Таблица 6.3**

№	H	X	Y	Y <sub>i</sub>	V	V <sub>T</sub>	φ	φ <sub>ср</sub>	ξ <sub>ср</sub>	Постоянная величина
	см	См	см	см	см/с	см/с				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.										
2.										

#### ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ.

1. Открывают кран /2/ и по показаниям пьезометров устанавливают желаемый напор над центром отверстия.
2. Наблюдают форму поперечного сечения струи и штангенциркулем замеряют сжатого сечения струи.
3. Для определения действительной скорости замеряют координаты «X» и «Y». Рейка /5/ смещена относительно оси «Y» на величину «Y<sub>0</sub>» (рис.7.1а), определяемую шпигельмасштабом по оси струи в сжатом сечении. Для трех точек траектории падающей струи производят замеры ее координат.
4. Замеряют объем воды в мерном сосуде /7/ и время его наполнения.

Результаты замеров заносятся в таблицу 6.1, 6.2, 6.3.

#### ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ.

По диаметру струи в сжатом сечении определяется площадь сжатого сечения струи

$$\omega_{сж} = \frac{\pi d_{сж}^2}{4}$$

И коэффициент сжатия струи  $\varepsilon = \frac{\omega_{сж}}{\omega}$

Подсчитывают действительный и теоретический расход жидкости через малое отверстие и коэффициент расхода.

$$Q = \frac{W}{t}; \quad Q_T = \omega \sqrt{2gH}; \quad \mu = \frac{Q}{Q_T}$$

Расчетное значение координаты «у» определяется по формуле

$$Y = Y_0 - Y,$$

« $Y_0$ » - координата струи в сжатом сечении, которая во время опытов не измеряется.

Определяют действительную скорость

$$V = X \sqrt{\frac{g}{2Y}};$$

теоретическую скорость

$$V_T = \sqrt{2gH};$$

коэффициенты скорости и местного сопротивления

$$\varphi = \frac{V}{V_T}; \quad \xi_{кр} = \frac{1}{\varphi^2} - 1.$$

Контрольные вопросы:

1. Какие отверстия называется малыми?
2. Дайте определения для тонкой стенки?
3. Приведите формулу для определения коэффициента сжатия струя?
4. Приведите формулу определения средней скорости в сжатом потоке?
5. Как определяется действительная скорость в сжатом сечении струи?

## Лабораторная работа №7

### ИЗМЕРЕНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Цель работы:

- 1) Определение опытного и расчётного времени истечения жидкости при переменном уровне жидкости.
- 2) Определение коэффициента расхода при переменном и постоянном уровнях воды в сосуде.

#### Краткие теоретические сведения

В практике часто встречается истечение жидкости через отверстие в сосуде. При этом истечение жидкости может происходить при одном из следующих условий:

- 1) при постоянном уровне воды в сосуде;
- 2) при переменном уровне воды в сосуде.

В первом случае истечение характеризуется расходом жидкости вытекающей из отверстия. А во втором случае – временем истечения жидкости.

Найдём теоретический расход жидкости, истекающей из отверстия в тонкой стенке сосуда с постоянным уровнем жидкости в нём.

Выбрав плоскость сравнения  $O - O$ , параллельной днищу сосуда, напишем уравнение Бернулли для сечения 1 – 1, соответствующего верхнему уровню жидкости в сосуде, и сечение 2 – 2, плоскость которого через самое узкое сечение вытекающей струи (примем жидкость за идеальную):

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{W_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{W_2^2}{2g} \quad (1)$$

Т.к. сосуд открытый  $P_1=P_2$  и уровень воды постоянный  $W_1=0$ , поэтому  $z_1=z_2=H$ . В этом случае

$$\frac{W_2^2}{2g} = H \quad \text{или} \quad W_2 = \sqrt{2gH} \quad (2)$$

А в реальных жидкостях правая часть этого уравнения умножается на коэффициент  $\varphi$ , т.е.

$$W_2 = \varphi \sqrt{2gH}$$

Скорость истечения жидкости из отверстия в сосуде будет меньше скорости в сечении 2 – 2, т.к. площадь поперечного сечения отверстия больше площади сечения 2 – 2. Поэтому

$$W_{om} = EW_2 = E\varphi\sqrt{2gH} = \alpha\sqrt{2gH}$$

Или объёмный расход:

$$V_x = \alpha F_{om} \sqrt{2gH} \quad (3),$$

где  $E = F_2/F_{от}$  – коэффициент сжатия;

$\alpha = \varphi E$  – коэффициент расхода;

$F_{от}$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>

Коэффициент расхода определяется экспериментально. Коэффициент расхода жидкостей по свойствам, не сильно отличающимся от воды равен:

-  $\alpha = 0,62$  при истечении через отверстие;

-  $\alpha = 0,82$  при истечении через насадки.

Из выше рассмотренной формулы видно, что расход жидкости, тонкой стенке сосуда с постоянным уровнем жидкости зависит от уровня жидкости и от размеров отверстия, но не зависит от формы сосуда.

Теперь найдём время, затрачиваемое на изменение расхода жидкости от  $H_1$  до  $H_2$ . Для этого напишем расход жидкости за очень короткое время  $dt$ :

$$dV = V_x d\tau = \alpha F_{om} \sqrt{2dH} d\tau \quad (4)$$

За это время  $d\tau$  уровень жидкости также изменяется на  $dH$  и т.к. площадь поперечного сечения сосуда постоянная, то

$$dV = -Fdh,$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения сосуда, м<sup>2</sup>.

Знак минус в правой части уравнения указывает на уменьшение уровня жидкости в сосуде.

Приравниваем два вышерассмотренных уравнения:

$$\alpha F_{om} \sqrt{2dH} d\tau = -Fdh \quad (5)$$

$$d\tau = -\frac{Fdh}{\alpha F_{om} \sqrt{2gH}}.$$

Проинтегрируя, получим:

$$\tau = -\frac{2F(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\alpha}$$

**Схема опытной установки:**

Подача воды в сосуд (1) через трубопровод (5) идёт из городского водопровода и регулируется вентилем для подвода воды (2). Наполнение сосуда водой до определённой высоты фиксируется по шкале (3), установленной сбоку сосуда. А снизу же сосуда есть четыре отверстия – насадки разного диаметра.

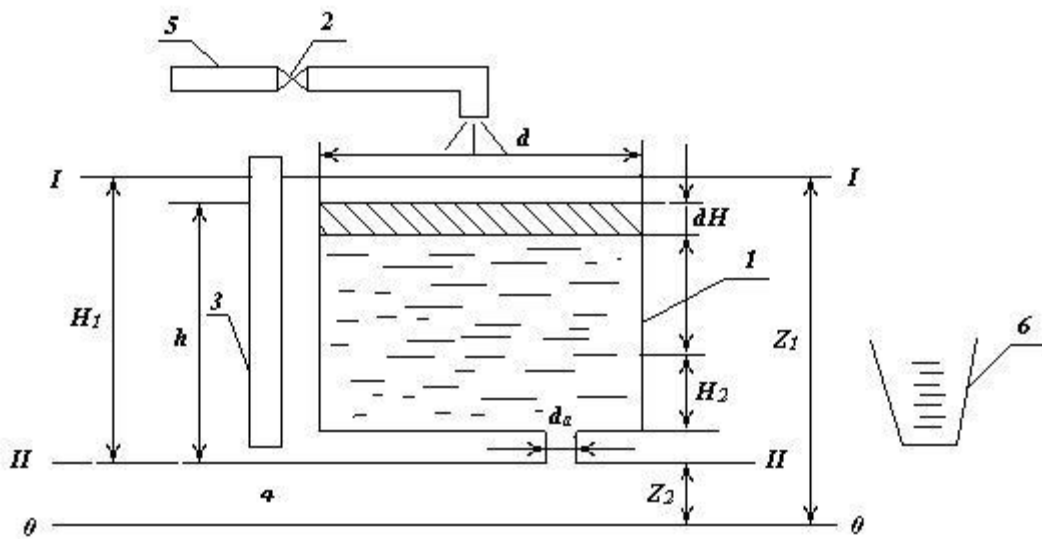


Рисунок 7.1 Схема установки, предназначенной для изучения истечения жидкости из отверстия в сосуде.

Работа состоит из двух частей. В первой части - уровень воды в сосуде (1) постоянный. Каждый раз перед началом опыта сосуд (1) при помощи вентиля (2) заполняется водой до определённого уровня, затем вентиль (2) закрывается.

Во второй части работы – находится коэффициент расхода при постоянном и переменном уровне жидкости. Для поддержания постоянного уровня воды в сосуде, в нём установлена водосливная труба (7) для перелива лишних жидкостей. При этом для дальнейшего проведения опыта вентиль (2) должен быть открыт. Расход истекающей жидкости измеряется при помощи мерного бака (6). При выполнении второй части работы пользуются только одним из отверстий (самым большим), установленных в днище сосуда. Только при условии, что днище сосуда будет гладким и ровным при установленном к нему отверстию – насадке (часть трубы) находится коэффициент расхода.

## 1 – часть

### *Порядок выполнения работы.*

В первой части работы открывают вентиль (2) сосуд (1) заполняется водой до определённого уровня  $H_1$ , при этом все отверстия в днище сосуда (1) должны быть закрыты, а вентиль (8) под мерным баком (6) должен быть открыт. Выбранный уровень  $H_1$  записывается в тетради. Затем открывается одно из отверстий в днище сосуда (1) и запускается секундомер. После некоторого истечения жидкости отверстие закрывается затычкой и секундомер останавливается. Следующий выбранный уровень воды ( $H_2$ ) в сосуде (1) и показания секундомера также записываются в тетрадь. Для каждого отверстия опыт надо повторить как минимум два раза.

После завершения всех измерений начинаются вычисления.

После истечения жидкости из отверстия в днище сосуда; время снижения уровня воды в сосуде от высоты  $H_1$  до высоты  $H_2$  находится по следующей формуле:

$$\tau = -\frac{2F(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\alpha F_{от} \sqrt{2g}},$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения сосуда,  $m^2$ .

Все измеренные и вычисленные величины заносятся в расчётную таблицу 7.1.

**Таблица 7.1.**

№	Измерения			Вычисления	
	Первоначальный уровень жидкости: $H_1$ (м)	Конечный уровень жидкости: $H_2$ (м)	Опытное время: $\tau_{оп}$ (сек)	Площадь поперечного сечения сосуда: $F$ ( $m^2$ )	Площадь поперечного сечения отверстия: $F_{от}$ ( $m^2$ )
1					
2					

## 2 – часть

### *Порядок выполнения работы.*

Перед началом опыта все 4 отверстия в днище сосуда (1) закрываются, а вентиль (2) – открывается. При этом насадку самого большого отверстия надо убрать. Первоначально опыт проводится для переменного уровня воды в сосуде (1). Для этого вентиль (2) открывается и сосуд (1) заполняется водой до определённого уровня  $H_1$ , затем вентиль (2) закрывается. Высота  $H_1$  записывается в тетрадь.

После этого самое большое отверстие в днище сосуда (1) открывается и запускается секундомер. После снижения уровня воды



до высоты  $H_2$  отверстие закрывается и секундомер останавливается. Время затраченное на изменение уровня воды от  $H_1$  до  $H_2$  записывается в тетрадь. Сосуд (1) снова заполняется до уровня воды  $H_1$  и опыт проводится 3 – 4 раза.

Затем опыт проводится для постоянного уровня воды в сосуде (1). Перед началом опыта вентиль (8) и все отверстия сосуда (1) закрываются, и открыв вентиль (2) сосуд (1) заполняется водой до уровня водосливной трубы (7).

В продолжении опыта вентиль (3) должен быть открыт настолько, чтобы расход жидкости истекающей из трубопровода (5) должен быть немного больше расхода жидкости, истекающей из отверстия в днище сосуда. Потом открывается самое большое отверстие в днище сосуда (1). Вытекший из отверстия и поступивший в мерный бак (6) объём жидкости открытием вентиля (8) освобождает мерный бак, и измерения повторяются. И здесь опыт проводится.

Теперь установив насадку на проверенное отверстие в днище сосуда (1) опыты повторяются 6 – 8 раз в вышеперечисленном порядке.

После проведения повторных измерений начинают использоваться их результаты.

### ***Обобщение результатов опыта и построение расчета:***

При переменном уровне воды коэффициент расхода находится из уравнения (5), а при постоянном уровне воды – из уравнения (3). Объёмный расход находится из уравнения:

$$V_x = V / \tau,$$

где  $V$  – объём жидкости, истекающий из отверстия,  $m^3$ ;  
 $\tau$  - время истечения жидкости, сек.

Измеренные и вычисленные величины при переменном уровне воды заносятся в таблицу 7.2., а при постоянном уровне – в таблицу 7.3.

***Таблица 7.2.***

№	Измерения			Коэффициент расхода	Дополнения
	Первоначальный уровень воды $H_1$ (м)	Конечный объём $H_2$ (м)	Опытное время, $\tau$ (сек)		
1					
2					
3					

**Таблица 7.3.**

№	Измерения			Вычисления		
	Первоначальный объём воды; $H_1$ (м)	Время истечения воды; $\tau$ (сек)	Конечный объём воды; $H_2$ (м)	Расход воды; $V_x$ м <sup>3</sup> /сек	Коэффициент расхода;	дополнения
1						
2						
3						

Контрольные вопросы:

- 1) Какие трубки называют насадками?
- 2) Для каких целей используются насадки?
- 3) При каких размерах и видах насадок через них проходит наибольший расход жидкости?
- 4) Какие виды насадок существуют?
- 5) С помощью какой формулы определяется время истечения жидкости из сосуда большого объёма через насадку?
- 6) Приведите и определите формулу теоретического расхода жидкости, истекающей из насадки.

## Лабораторная работа № 8

### ХАРАКТЕРИСТИКА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

#### Цель работы:

Насосы используются во многих отраслях народного хозяйства. Все насосы подразделяется на две основные группы: динамические и объемные.

Динамическими называются насосы, в которых сообщение энергии жидкости осуществляется путем воздействия гидродинамических сил на незамкнутый объем жидкости при постоянном сообщении входа и выхода насоса.

Объемными называются насосы в которых сообщение энергии жидкости осуществляется периодически изменением замкнутого объема при по переменном сообщении его со входом и выходом насоса.

Лопастными называются насосы, в которых сообщение энергии жидкости осуществляется при обтеканий лопастей рабочего колеса. Лопастные насосы объединяют в свою очередь две группы насосов: центробежные и осевые.

Центробежными называются лопастные насосы с движением жидкости через рабочее колесо от центра к периферии, а осевыми - лопастные насосы с движением жидкости через рабочее колесо в направлении его оси.

Насосы трения и инерции – эта группа динамических насосов, в которых перемещения жидкости осуществляется силами трения и инерции. В эту группу входят вихревые, шнековые, лабиринтные, червячные и струйные насосы.

Группа объемных насосов объединяет поршневые, плунжерные, диафрагмовые, роторные, шестеренчатые, винтовые.

Рассмотрим рабочую схему центробежного насоса (рис 8.1)

Достоинства центробежных насосов – компактность, сравнительно небольшой вес, малые габариты при высокой производительности возможность непосредственно соединения с электродвигателем, плавная и непрерывная подача жидкости, простота пуска и регулировки.

Недостатки: неустойчивость напора – с увеличением производительности (при  $n = \text{const}$ ) напор, создаваемый насосом уменьшается, невысокий к.п.д. для малых производительностей.

Внутри неподвижного корпуса 1 помещено рабочее колесо 2, закрепленное на валу 3. Корпус насоса патрубками 4 и 5 соединен с всасывающим и напорным трубопроводами.

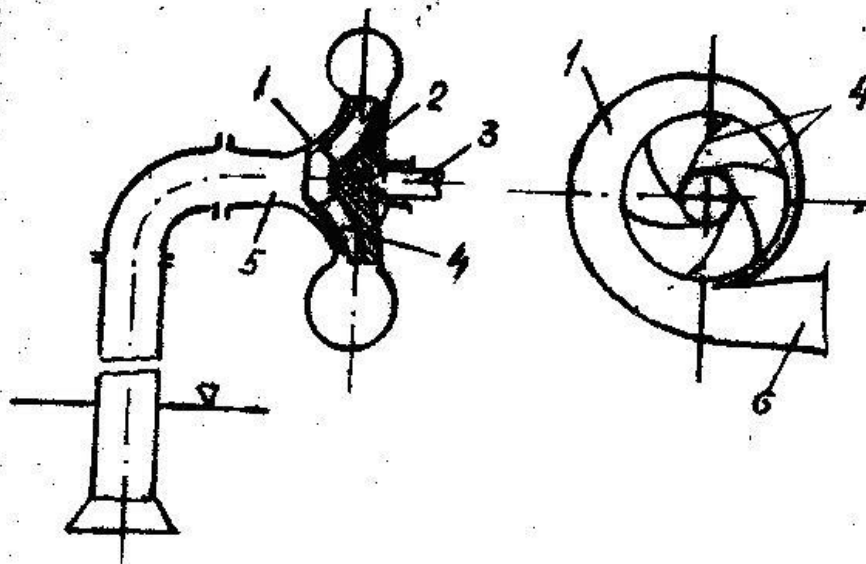


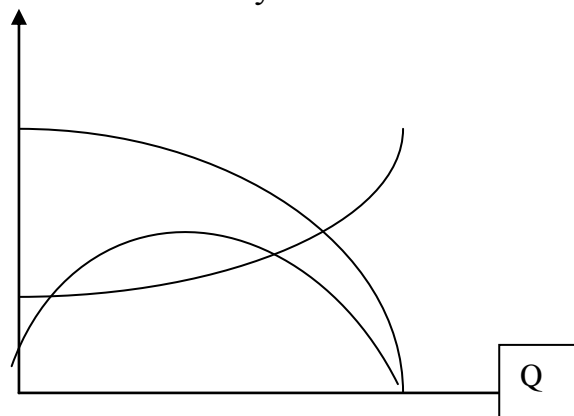
Рисунок 8.1

Если всасывающий трубопровод и корпус насоса наполнить жидкостью, а затем привести во вращение рабочее колесо, то жидкость, заполняющая каналы между лопастями, под действием центральной силы будет отбрасываться от центра колеса к периферии. Выйдя из колеса, жидкость поступает в спиральную камеру и далее в нагнетательный трубопровод. При этом перед входом жидкости в рабочее колесо образуется разрежение, под действием которого жидкость из приемного резервуара поступает через всасывающий трубопровод в насос.

Центробежные насосы могут быть не только одноступенчатыми, но и многоступенчатыми, однако принцип их действия во всех случаях остается одним и тем же – перемещение жидкости осуществляется под действием центробежной силы, развиваемой вращающимся рабочим колесом.

У центробежного насоса с изменением производительности изменяются и другие параметры его работы – напор, мощность,

Рисунок 8.2.



## Характеристика центробежного насоса.

Перед пуском центробежные насосы заливают перекачиваемой жидкостью. При изменении в небольших пределах число оборотов «К» центробежного насоса, его подача  $Q$ , напор «Н» и потребляемая мощность «N» изменяются в следующих соотношениях:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

Зависимости Q-H; Q-N; Q- $\eta$  называются характеристиками насоса и устанавливаются опытным путем.

### Описание установки.

Центробежный насос (3) установлен на одном валу с электродвигателем переменного тока. Число оборотов замеряется. Вода всасывается насосом из расходного бака (5). На всасывающем трубопроводе установлены приемный клапан (6), препятствующий выходу воды при заливе насоса через всасывающую трубку(7). На нагнетательном трубопроводе (8) установлены манометр (9) и вентиль для регулирования расхода (подачи) воды (10) Вода из нагнетательного трубопровода поступает в один из мерных баков (11).Каждый из баков имеет водомерную шкалу (4), которая проградуирована в единицах объема (л), а также в баке смантировано сливная труба во избежания переполнения . В дне баков расположены патрубки с вентилями (1), через которые вода из мерного бака сливается (1) в расходный бак, откуда вновь всасывается насосом..

### Методика проведения работы.

При испытании насоса установки определяют величины необходимые для построения характеристик насоса: Q-H, Q-N, Q- $\eta$ . Испытания проводят при постоянном числе оборотов, но при разных, всё увеличивающихся расходах (подачах)  $Q$  насоса. Изменение подачи  $Q$  производят постепенным открытием вентиля(12). Первое наблюдение проводят при полностью закрытом венбтиля, последующие при постепенном открытии на четверть оборота. При этом необходимо производить замеры: подачи насоса, разрежения во всасывающей трубе, давления на нагнетательной трубе, напряжения силы электрического тока на двигателе.

Замер показателей работы насосной установки производят следующим образом.

Подача: закрывает в одном из мерных баков спускной вентиль и включает секундомер. Количество воды, замеренное по водомерному шкалу, и время замера записывают в таблицу. Напор, выраженный в м. столба подаваемой жидкости (воды) определяют следующим образом:

$$H = P_m + P_b + \frac{W_H^2 - W_b^2}{2g} + h$$

$P_m$  и  $P_b$  – показание манометра и вакуумметра в м.столба подаваемой жидкости;

$W_m$  и  $W_b$  – скорость воды в местах присоединения трубок манометра и вакуумметра.

$h$  – Расстояние между уровнями присоединения вакуумметра и манометра.

Всасывающий и нагнетательный трубопроводы одинакового диаметра, поэтому  $W_m$  и  $W_b$  одинакова и тогда  $H = P_m + P_b + h$ .

Обработка опытных данных и составления отчета.

Производительность (подача) насоса ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $Q = \frac{Q^1}{1000\tau}$  где

$Q^1$  – объем воды, определенный по водомерному стеклу, дм (или л);

$\tau$  – продолжительность замера, с.

Мощность, потребляемая насосов установкой

$$N = \frac{VJ}{1000}$$

$V$  - напряжения тока, В.

$J$  – сила тока, А.

Коэффициент полезного действия насоса определяют из формулы

$$N = \frac{QHg\rho}{1000\eta} \text{ откуда } \eta = \frac{QHg\rho}{1000N}$$

где  $Q$  – производительность (подача насоса),  $\text{м}^3/\text{с}$

$\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$g$  – ускорения свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$H$  – полный напор, создаваемый насосом, в м. столба подаваемой жидкости.

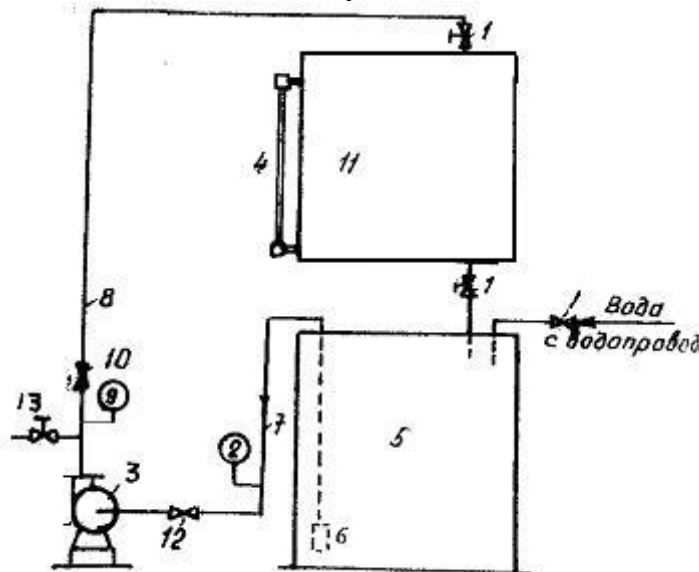
Заканчивается работа построением графиков:  $Q-N$ ,  $Q-\eta$ ,  $Q-H$ .

**Таблица 8.1**

№	Число оборотов об/мин	Продолжительность замера, с	Кол-во воды, дм <sup>3</sup>	Давление Р <sub>М</sub>		Разрежение Р <sub>В</sub>		Полный напор Н	Мощность кВт	КПД %
				$\frac{кгс}{см^2}$ или мм.рт.ст.	м.в.ст	$\frac{кгс}{см^2}$	м.вод.ст			
	n	$\tau$	Q	P <sub>М</sub>	H <sub>М</sub>	P <sub>С</sub>	H <sub>В</sub>	H	N	$\eta$
1										
2										

Для каждой подачи (Q) производить 3 замера. В таблицу вносить среднюю величину из 3-х замеров.

**Схема установки**



**Рисунок 8.3**

1. Вентили 2. Вакуумметр. 3. Насос 4. водомерное стекло 5. Расходный бак. 6. Обратный клапан 7. Всасывающий трубопровод 8. Нагнетательный трубопровод 9. Манометр 10., 12, Регулирующий вентили 11. Мерные баки. 13 Сбросный вентиль.

**Контрольные вопросы:**

- 1) Устройство центробежного насоса.
- 2) Характеристика центробежного насоса.
- 3) Высота всасывания и явление кавитации.
- 4) Напор, развиваемый насосом.

5) Зависимость основных параметров работы центробежного насоса от числа оборотов рабочего колеса.

Типы и конструкции центробежных и поршневых насосов



## Литература

1. Т.М. Башта С.С Руднев, Б.Б.Некрасов и др. Гидравлика, гидравлические машины гидравлические приводы М.1982 г.
2. А.А. Угенчус Гидравлика и гидравлическиемашины Харьков, 1982 г.
3. О.В.Байбаков, Д.А.Бутаев, З.А.Калмикова «Лабораторный курс гидравлики и насосов», М., 1974 г.
4. И.Е. Идельчик «Справочник по гидравлическим сопротивлениям», М, 1995 г.
5. С. Бретшнайдер «Свойства жидкости и газов» Под редакцией П.Г. Романкова.
6. И.Л. Пастоев, Н.С. Гудилин и др «Гидромеханика», учебное пособие. М.: МГГУ 1995 г.
7. Н.С. Гудилин., Е.М. Кривонко., Б.С. маховиков., И.Л. Пастоев «Гидравлика и гидропривод. М.: 1996 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

1.	Предисловие	5
2.	Исследование режимов движения жидкости на приборе Рейнольдса	7
3.	Экспериментальное изучение уравнения Бернулли	12
4.	Тарирование Расходомера Вентури	18
5.	Определение коэффициента гидравлического трения по длине	22
6.	Определение коэффициентов местных сопротивлений	28
7.	Истечение жидкости через малое отверстие в тонкой стенке	33
8.	Измерение истечения жидкости	38
9.	Характеристика центробежного насоса	44

