

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П.А. КОСТЫЧЕВА»**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

для лабораторных занятий по дисциплине «Гидравлика»

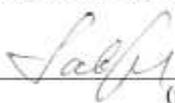
Рязань 2015 г.

## ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ

Методические указания составлены с учетом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки (специальности) 08.03.01 Строительство, утвержденного 12 марта 2015г. №201

(дата утверждения ФГОС ВПО)

Разработчик доцент, «Строительство инженерных сооружений и механика» (СИСИМ)  
(должность, кафедра)

  
\_\_\_\_\_ (подпись)

Гаврилина О.П.

Рассмотрена и утверждена на заседании кафедры «\_16\_»\_04\_ 2015 г.,  
протокол №\_10\_

Заведующий кафедрой «Строительство инженерных сооружений и механика» \_\_\_\_\_  
( кафедра)

  
\_\_\_\_\_ (подпись)

Борычев С.Н.

Методическое указание одобрено учебно - методической комиссией автодорожного факультета  
«\_01\_»\_07\_ 2015г., протокол №\_11\_

Председатель учебно - методической комиссии автодорожного факультета

  
\_\_\_\_\_ (подпись)

Успенский И.А.

Рецензент: доктор технических наук, доцент  Тришкин И.Б.

## СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ		4
ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ПОГРЕШНОСТИ		5
ЗАПИСЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА		7
ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ		7
НЕКОТОРЫЕ СОВЕТЫ И УКАЗАНИЯ		8
ОСНОВНЫЕ ПРВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ		9
1.	Методика и средства измерения гидравлических величин. Определение гидростатического давления в замкнутой области	10
2.	Исследование режимов движения жидкости в трубопроводе	17
3.	Экспериментальное исследование уравнения Д. Бернулли	21
4.	Исследование истечения жидкости через малое отверстие в тонкой стенке и насадки	27
5.	Исследование коэффициента сопротивления трения по длине при турбулентном напорном движении в трубопроводе	34
6	Определение коэффициентов местных сопротивлений	38
Список литературы		41

## **ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ**

Лабораторные работы являются составной частью курса гидравлики и гидравлических машин. Их выполнение позволит студентам усвоить физическую сущность изучаемых гидравлических явлений, овладеть методами проведения гидравлических исследований, обработки и обобщения полученных результатов, усвоить и экспериментально проверить теорию, приобрести навыки практических приложений теории, освоить методы гидравлических испытаний, сущность гидравлических процессов в гидравлических машинах, их работу и определение их гидравлических параметров и характеристик.

Лабораторные работы носят исследовательский характер и для проведения их необходимо знание теории, методики исследований, владение способами измерения и оценки погрешностей измерения, методами обработки результатов опытов и их анализа. Данное пособие содержит методические указания по выполнению лабораторных работ по первой части курса – по гидравлике.

В пособии, наряду с общими вопросами, по каждой работе излагаются цели и задачи работы, приводятся основные теоретические положения, описывается экспериментальная установка, порядок проведения и методика обработки экспериментальных (опытных) данных. Все записи опытных данных заносятся в журнал лабораторных работ, в котором выполняется обработка и анализ результатов опытов. Там же приводятся контрольные вопросы, на которые студенты должны ответить по данной теме.

## ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ПОГРЕШНОСТИ.

Измерением называется процесс нахождения физической величины опытным путем с помощью специальных средств. При измерении главное – это получение достоверного результата, то есть, точность измерения, которая характеризует качество измерения, отражающее близость результатов измерений к их истинному значению. Следует иметь в виду, что как бы точно ни производилось измерение, какие бы методы и средства при этом не использовались, полученный результат измерения всегда отличается от истинного значения измеряемой величины. Это объясняется многими причинами: несовершенством средств измерения, влиянием различных переменных факторов (температуры, освещенности, плотности жидкости и др.), методами измерения, особенностями исследования, его навыками и др. Поэтому, в исследовательской практике говорят не об истинном, а действительном значении измеряемой величины, под которым понимают значение измеряемой величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что может быть использовано вместо него.

Отклонение результата измерения от истинного значения называется абсолютной или истинной погрешностью или ошибкой. Выражается она в единицах измеряемой величины и определяется формулой:

$$\Delta X = X_n - X \quad (1)$$

где  $X_n$  - значение, полученное при измерении;  
 $X$  - истинное значение измеряемой величины.

Как отмечено выше, на практике истинное значение измеряемой величины неизвестно, поэтому в исследовательской практике говорят не об истинных, а о действительных или вероятных значениях измеряемой величины.

Принято считать, что наиболее достоверным или вероятнейшим значением измерений является среднее арифметическое:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x + \delta, \quad (2)$$

где  $\delta$  - вероятнейшая ошибка, определяемая по формуле:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (3)$$

где  $\delta_i$  - вероятнейшая ошибка  $i$ -го измерения, равная разности между вероятнейшим значением измеряемой величины  $\bar{x}$  и  $i$ -тым значением измерения.

При большом числе измерений  $\delta$  стремится к нулю и  $\bar{x}$  мало отличается от  $x$ . Следовательно, чем больше повторных измерений, тем точнее результат измерения.

Численное значение абсолютной погрешности, то есть погрешности, выраженной в единицах измерения измеряемой величины, не всегда дает представление о точности данного измерения. Например, ошибка в измерении расхода, равная 1 л/с при измеряемом расходе 10 л/с, дает низкую точность, а при 100 л/с – высокую точность. Поэтому, на практике

пользуются не абсолютной, а относительной погрешностью, которая определяется как отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\beta = \frac{\Delta x}{x} \quad (4)$$

Часто абсолютную погрешность выражают в процентах:

$$\beta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% \quad (5)$$

Для рассматриваемого примера относительная погрешность в первом случае равна 10%, а во втором 1%. Аналогично вычисляется относительная вероятнейшая погрешность, только вместо  $\Delta x$  подставляется в формулы (4,5)  $\delta$  и вместо  $x$  величина  $\bar{x}$ . В зависимости от причины возникновения, проявления и учета различают систематическую, случайную и грубую погрешности измерения.

Систематической называют погрешность или ошибку, которая остается постоянной или закономерно измеряется при повторных измерениях одной и той же величины. Эта ошибка возникает при несоответствии действительного значения меры, с помощью которой выполняют измерения, её номинальному значению, несовершенства метода измерения, измерения параметров измерительной цепи и других причин. Для исключения систематических ошибок измерительные устройства должны быть аттестованы.

Случайная погрешность измерения – составляющая погрешности, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях, одной и той же величины. Её значение не может быть предсказано, Для уменьшения её влияния не результат измерения, последние производят неоднократно, не менее чем с трёх- или пяти- кратной повторностью.

Грубая ошибка – это погрешность, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях погрешность. Она может быть вызвана, например, неправильным отсчетом числового значения, неверной записью, существенным нарушением условий измерения и другими причинами. Грубые ошибки исключаются как не заслуживающие доверия.

В теории ошибок доказано, что более точную оценку результатов измерений даёт не среднее арифметическое (математическое ожидание при большом  $n$ ), а среднее квадратическое отклонение результата измерений  $\sigma$ , которое вычисляют по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\delta_1)^2 + (\delta_2)^2 + \dots + (\delta_n)^2}{n - 1}} \quad (6)$$

Все вышесказанное относится к определению погрешностей прямых измерений. На практике весьма часто приходится производить косвенные измерения, например, измерение расхода истечение на водосливе и др.

Среднее квадратическое отклонение косвенного измерения  $\sigma_y$  со средним квадратическими отклонениями прямых измерений  $\sigma_x$  связано зависимостью:

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} \sigma_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n} \sigma_{x_n}\right)^2}, \quad (7)$$

где  $F$  – функция прямых измерений;

$\frac{\partial F}{\partial x_i} \sigma_i$  – частная погрешность  $i$  – го косвенного измерения. По известному

значению  $\sigma_y$  находят вероятную погрешность  $\sigma_{by} = 2\sigma_y / 3$  и предельную погрешность  $\sigma_{npy} = 3\sigma_y$  результата косвенного измерения.

### **ЗАПИСЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА.**

Результат измерения, как правило, записывают двумя числами – значением измеряемой величины и параметром точности результата.

Числовое значение результата должно оканчиваться десятичными знаками того же порядка, что и погрешность. Обычно погрешность записывают одной значащей цифрой и лишь при ответственных измерениях – двумя.

Округлять результаты измерений следует, придерживаясь следующих правил: лишние (по отношению к параметру точности) значащие цифры целых чисел заменяют нулями, а у десятичных дробей отбрасывают; если первая (слева) из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр менее пяти, то оставшиеся цифры не изменяют; когда эта цифра равна пяти и более, и последующие цифры не нулю, то последнюю цифру в округляемом числе увеличивают на единицу; если заменяют нулём или отбрасывают цифру пять одну или с последующими за ней нулями, то последнюю цифру в округляемом числе оставляют без изменения (когда она четная) или увеличивают на единицу (когда она нечетная).

Например, если полученные значения результатов измерений равны:  $x_1 = 2,874 \pm 0,03$ ;  $x_2 = 2,4652 \pm 0,13$ ;  $x_3 = 2,3650 \pm 0,15$ ;  $x_4 = 2735 \pm 32$ , то их округленные значения будут равны:  $x_1 = 2,87 \pm 0,03$ ;  $x_2 = 2,47 \pm 0,13$ ;  $x_3 = 2,36 \pm 0,15$ ;  $x_4 = 2740 \pm 32$

Когда результат измерения записывают без указания погрешности, его числовое значение округляют так, чтобы предельная погрешность результата не была больше единицы последнего оставленного знака.

### **ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ.**

При выполнении лабораторных работ очень часто результаты опытов представляют в виде графиков. Это делается с одной стороны для большей наглядности опытов, с другой – для определения различных коэффициентов и др., чтобы результаты можно было записать аналитически, например, при определении коэффициента расхода истечения из отверстия в функции относительного напора истечения и др.

При построении графиков масштабы следует выбирать так, чтобы получить примерно равные размеры по длине и по высоте.

Уравнение линий на графике подбирают по аналогам с известными графическими зависимостями, описываемыми уравнениями – прямая,

парабола, гипербола и др. Можно применять специальные методы, например, метод наименьших квадратов.

Во многих случаях выбором масштабов по осям графика линейную зависимость можно представить (в пределах допустимой точности) в виде прямой, которая легче поддается математической обработке – описывается уравниванием прямой линии. Пусть, например, необходимо определить коэффициент расхода отверстия по данным измерений расхода  $Q$  воды из резервуара через отверстие сечением  $S$  в зависимости от напора истечения. Расход истечения определяется по формуле:

$$Q = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2gH} \quad (8)$$

Если результаты опытов  $Q=f(H)$  представить графически, отложив по осям  $Q$  и  $H$ , то точки расположатся вокруг параболы, провести которую достаточно сложно. Задача существенно упрощается, если, например, по оси абсцисс отложить  $lgH$ , а по оси ординат  $lgQ$ . Тогда точки расположатся около прямой линии, которую нетрудно провести с достаточной точностью и, получив по уравнению прямой  $Q=f(H)$  и подставив это выражение в формулу (8), легко по нему определить коэффициент расхода отверстия  $\mu$  в функции  $H/d$ , то есть в безразмерных величинах, в виде уравнения.

### **НЕКОТОРЫЕ СОВЕТЫ И УКАЗАНИЯ.**

1. Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо четко освоить основные теоретические положения изучаемого явления, так как не овладев основами теории, нельзя сознательно провести эксперимент и повысить уровень своих знаний. Контрольные вопросы позволяют студенту самостоятельно проверить подготовленность к выполнению работы.
2. Для выполнения лабораторной работы необходимо детально изучить лабораторную установку, тщательно ее проверить. Следует помнить известную истину, что установку можно считать действительно готовой к работе, если ее подготовил к работе сам экспериментатор.
3. Если опыт не получается, необходимо выдвигать и проверять различные предположения до тех пор, пока опытные данные не будут соответствовать теоретическим.
4. Измерения необходимо производить с максимально возможной точностью. Это достигается за счет внимания и подготовленности экспериментатора (студента), периодических перерывов в измерении с целью анализа полученных результатов и т. д. Перед снятием данных для построения кривой полезно провести несколько произвольных измерений по всему диапазону, чтобы удостовериться в возможности снятия данной характеристики. Это позволит проверить стабильность работы установки. Измерения необходимо производить при стационарном режиме процесса – явления. Поэтому, после пуска воды на установку необходимо замеры производить лишь после установления стационарного режима, при котором параметры процесса стабильны, Это определяется визуально по мерным приборам и устройствам.

5. Необходимо аккуратно и полно вести записи при проведении опытов. Обработку результатов опытов надо производить в лаборатории, чтобы в случае несоответствия теории и опыта продублировать эксперимент.

### **ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ**

1. До начала работы необходимо изучить схему лабораторной установки, обратив внимание на порядок выполнения работы.
2. Включать в работу и выключать электрические, гидравлические приводы и другие установки можно только с разрешения преподавателя либо лаборанта.
3. Вода, используемая для изучения гидравлических явлений на лабораторных установках, является оборотной, в ней могут находиться опасные для здоровья микроорганизмы, поэтому необходимо соблюдать осторожность, в частности её нельзя пить.
4. Категорически запрещается брать руками, отсасывать ртом ртуть, нагнетать воздух и приборы, заполненные ртутью.
5. Следует помнить, что действие минерального масла на незащищенные участки тела может оказать неблагоприятное воздействие.
6. В процессе проведения лабораторных работ быть осторожным при перемещении по мостикам, лесенкам, по возможности не касаться металлических частей при работе на экспериментальных стендах по испытанию гидромашин. В лаборатории не бегать и с установок не прыгать.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.

### Методика и средства измерения гидравлических величин.

#### Определение гидростатического давления в замкнутой области.

##### Цель работы:

- изучение сущности и свойства гидростатического давления, методов и средств измерения ГСД;
- определение гидростатического давления в замкнутой области.

##### Краткие теоретические сведения.

Гидростатическим давлением называется напряжениевнутри жидкости, возникающие от действия внешних сил и вышележащей жидкости.

Гидростатическое давление (ГСД) в точке является пределом отношения силы ГСД к элементарной площадке, на которую она действует, если последняя стремится к нулю:

$$P = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S} = \frac{dP}{dS} \quad (1.1)$$

Как видно из формулы (1.1) ГСД представляет собой напряжение и выражается в единицах силы на площадь  $[P] = \text{н/м}^2$ . Основная единица измерения ГСД – Паскаль,  $1 \text{ Па} = 1 \text{ н/м}^2$ . ГСД выражают также в  $\text{кг/см}^2$ ;  $1 \text{ кг/см}^2$  в этом случае называется технической атмосферой (Ат):  $1 \text{ Ат} = 1 \text{ кг/см}^2$ . Полное ГСД в технических атмосферах обозначается - Ата, избыточное - Ати, вакууметрическое – Атв.

ГСД иногда выражают в нормальных (физических) атмосферах (атм). Нормальная атмосфера соответствует давлению 760 миллиметров ртутного столба (760 ммНг) при температуре  $0^\circ\text{C}$  и равна 1,0334 ат.

$$1 \text{ атм} = 1,0334 \text{ Ат} = 1,0334 \text{ кг/см}^2 = 760 \text{ мм. рт. ст.}$$

Давление в 1 мм.рт.ст. (1 ммНг) называется тором (тор.). В инженерной практике единицы измерения давления и их взаимосвязь следующие:

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 98100 \text{ Па} = 735 \text{ мм.рт.ст.} = 10 \text{ м.вод.ст.}$$

Величина ГСД находится из основного уравнения гидростатики:

$$P = P_0 + \rho gh \quad (1.2)$$

где  $P$  – полное (абсолютное) ГСД, которое иногда обозначают  $P_{\text{полн}}$  ( $P_{\text{абс}}$ );

$P_0$  - «внешнее» давление, например, давление газовой среды;

$h$  – высота столба с плотностью  $\rho$  между точками, где давление  $P$  и  $P_0$ ;

$g$  – ускорение силы тяжести.

Если от полного давления  $P_{\text{полн}}$  отнять атмосферное  $P_{\text{атм}}$  то получим избыточное давление или манометрическое.

$$P_{\text{изб}} = P_{\text{полн}} - P_{\text{атм}} = P_0 + \rho gh - P_{\text{атм}} \quad (1.3)$$

*Превышение давления над атмосферным называют избыточным.*

Если давление на поверхности жидкости равно атмосферному ( $P_0 = P_{\text{атм}}$ ), например, в открытых резервуарах, то избыточное давление будет:

$$P_{\text{изб}} = \rho gh \quad (1.4)$$

Полное давление может быть и меньше атмосферного  $P_{\text{ПОЛН}} < P_{\text{ат}}$ . В этом случае разность между атмосферным и полным давлением называется вакуумметрическим давлением  $P_{\text{ВАК}}$ :

$$P_{\text{ВАК}} = P_{\text{ат}} - P_{\text{ПОЛН}} \quad (1.5)$$

*Вакуумметрическое давление означает недостаток до атмосферного.*

Если точка с указанными давлениями ( $P_{\text{ИЗБ}}$ ;  $P_0$ ) разделены несколькими столбами жидкости с различными плотностями, то искомое давление находится многократным применением основной формулы гидростатики к поверхности раздела между жидкостями:

$$P = P_0 + \sum \rho_i g h_i \quad (1.6)$$

где:  $h_i$  - высота столба жидкости с плотностью  $\rho_i$ .

Гидростатическое давление обладает следующими *свойствами*:

- 1) ГСД направлено по внутренней нормали к площадке действия;
- 2.) величина ГСД в данной точке не зависит от направления площадки, на которую оно действует, а зависит от глубины погружения точки под уровень и плотность жидкости.

Гидростатическое давление измеряется различными приборами. Все приборы для измерения давления можно классифицировать по следующим признакам:

- 1) по роду измеряемой величины;
- 2) по принципу действия;
- 3) по классу точности.

По роду измеряемой величины приборы делятся на приборы для измерения:

- 1) атмосферного давления ( $P_{\text{ат}}$ ) – барометр;
- 2) разности атмосферного и абсолютного давления, т. е. вакуума ( $P_{\text{ВАК}}$ ) – вакуумметр;
- 3) разности абсолютного и атмосферного, т. е. избыточного давления ( $P_{\text{М}}$ ) – манометра;
- 4) абсолютного давления, которое измеряется с помощью двух приборов – манометра и барометра, если измеряемое давление больше атмосферного:

$$P_{\text{АБС}} = P_{\text{ат}} + P_{\text{М}} \quad (1.7)$$

барометра и вакуумметра, если измеряемое давление меньше атмосферного:

$$P_{\text{АБС}} = P_{\text{ат}} - P_{\text{ВАК}} \quad (1.8)$$

Применяются эти приборы для специальных измерений абсолютных давлений.

По принципу действия все приборы можно разделить на жидкостные, механические, грузопоршневые, электрические и комбинированные.

По классу точности приборы для измерения давления делятся на классы. Класс точности (основная погрешность) прибора характеризуется его максимальной погрешностью, отнесенной к верхнему пределу измерения, выраженное в процентах.

Исторически первыми применяющимися для измерения давления были жидкостные приборы, основанные на принципе гидростатического уравнивания измеряемого давления столбом жидкости в приборе. На рис. 1.1 показаны простейшие жидкостные приборы для измерения давления.

Для измерения малых избыточных или вакуумметрических давлений применяются приборы со шкалами повышенной точности (в частности с наклонной шкалой – рис.1.1, е,ж), заполняемые рабочей жидкостью с относительно малым удельным весом (например, спиртом) и называются микроманометрами.

В приборах с наклонной шкалой длина  $l$  столбика рабочей жидкости связана с пьезометрической (вакуумметрической) высотой соотношением:

$$h_{M(B)} = l \sin \alpha \quad (1.9)$$

где  $\alpha$  - угол наклона шкалы к горизонту.

Поэтому относительная погрешность  $\varepsilon_l = \Delta l / l$  измерения меньше, чем относительная погрешность  $\varepsilon_0$  непосредственного измерения  $h$ .

Подсчет величины  $h = l \sin \alpha$  дает значение перепада, выраженное высотой столба жидкости, наполняющей манометр. Однако в технике принято измерение давления водного столба:

$$h_{вод} = h_{ж} \cdot \rho_{ж} / \rho_{вод} = l \cdot \rho_{ж} / \rho_{вод} \cdot \sin \alpha = l \cdot k \quad (1.10)$$

Величину  $\rho_{ж} / \rho_{вод} \cdot \sin \alpha$  обозначают через  $k$ . Значение этого коэффициента  $k$ , соответствующего определенным углам установки наклонной шкалы, обычно указаны на кронштейне прибора, где указывается так же плотность рабочей жидкости в приборе.

Основными преимуществами жидкостных приборов является простота устройства и высокая точность. Однако, узость диапазона измеряемых давлений, не превышающего 3 - 4 ат для ртутных манометров является их существенным недостатком. Другим недостатком жидкостных приборов, применяемых для измерения относительно больших давлений, является необходимость использования в качестве рабочей жидкости ртути, пары которой ядовиты.

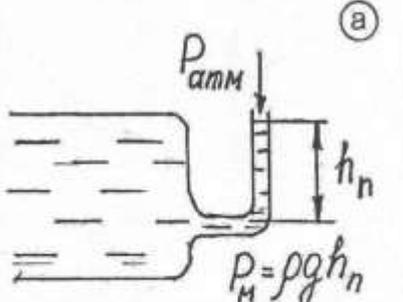
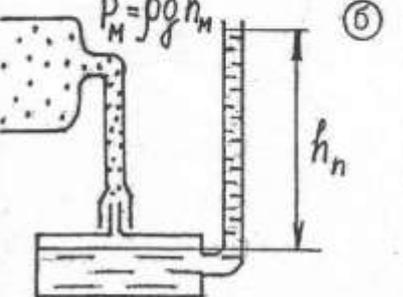
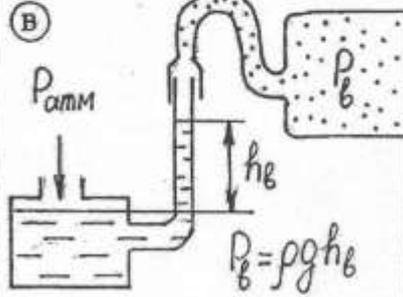
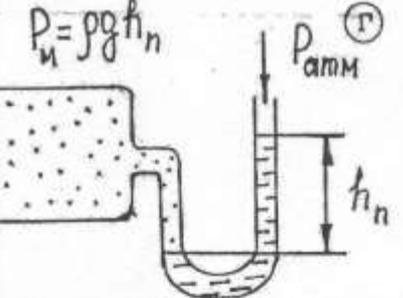
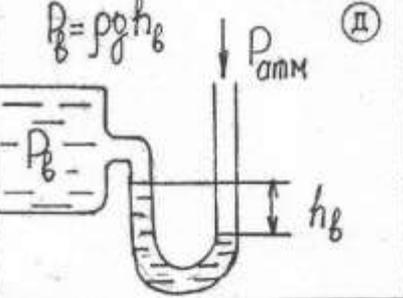
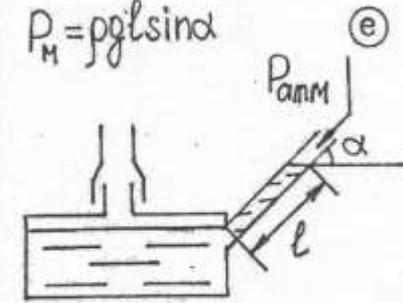
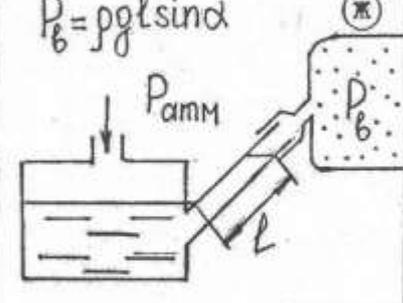
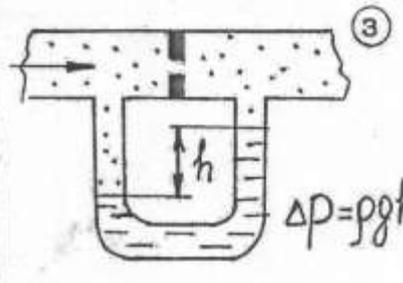
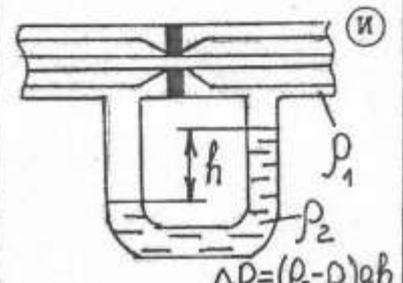
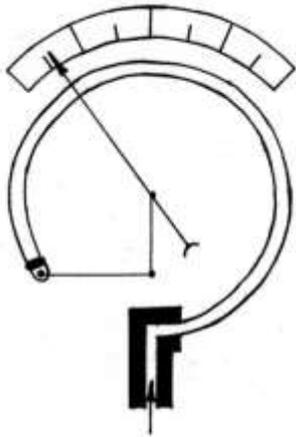
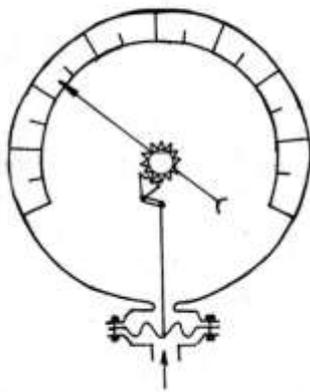
Наименование	При измерении избыточных давлений	При измерении вакуумметрических давлений
Пьезометр	 <p>а) <math>P_{атм}</math> <math>h_n</math> <math>P_м = \rho g h_n</math></p>	
Чашечный мановакуумметр	 <p>б) <math>P_м = \rho g h_n</math> <math>h_n</math></p>	 <p>в) <math>P_{атм}</math> <math>h_в</math> <math>P_в = \rho g h_в</math></p>
"U" - образный	 <p>г) <math>P_м = \rho g h_n</math> <math>P_{атм}</math> <math>h_n</math></p>	 <p>д) <math>P_в = \rho g h_в</math> <math>P_{атм}</math> <math>h_в</math></p>
Микроманометр	 <p>е) <math>P_м = \rho g l \sin \alpha</math> <math>P_{атм}</math> <math>\alpha</math> <math>l</math></p>	 <p>ж) <math>P_в = \rho g l \sin \alpha</math> <math>P_{атм}</math> <math>\alpha</math> <math>l</math></p>
Дифференциальный манометр	 <p>з) <math>h</math> <math>\Delta P = \rho g h</math></p>	 <p>и) <math>h</math> <math>P_1</math> <math>P_2</math> <math>\Delta P = (P_2 - P_1) \rho g h</math></p>

Рис.1.1. Жидкостные приборы для измерения давления



ПРУЖИННЫЙ МАНОМЕТР



МЕМБРАННЫЙ МАНОМЕТР

Принцип действия механических приборов заключается в том, что действию давления подвергается упругий элемент, деформация которого пропорциональна величине измеряемого давления.

По типу применения упругих элементов приборы этого класса делятся на пружинные, мембранные и сильфонные. Пружинные приборы имеют ряд преимуществ, важнейшими из которых являются: портативность, простота устройства, универсальность и простота применения, а главное огромный диапазон измерения измеряемых давлений (от десятков миллиметров водяного столба до 10000 ат).

В грузопоршневых приборах величина давления определяется по весу грузов, помещаемых на рабочей площадке поршня, под которым создано измеряемое давление.

В приборах электрического типа приемным элементом, преобразующим величину давления в тот или иной электрический сигнал, является датчик давления. В настоящее время для измерения давления известно использование индуктивных, емкостных, пьезометрических, полупроводниковых датчиков, а так же датчиков сопротивления. Электрические способы измерения незаменимы для измерений в нестационарных потоках при незначительных пульсациях давления.

Серийно выпускаемые приборы разделяются по классу точности.

Кроме того, все механические приборы можно разделить на технические и образцовые. Образцовые приборы непосредственно сверяются с эталонами и используются, главным образом для целей поверки. Технические приборы, менее точные, используются для непосредственных измерений.

### Описание экспериментальной установки.

Определение и изучение изменения гидростатического давления в замкнутой области приводится на установке, схема которой приведена на рисунке 1.2.

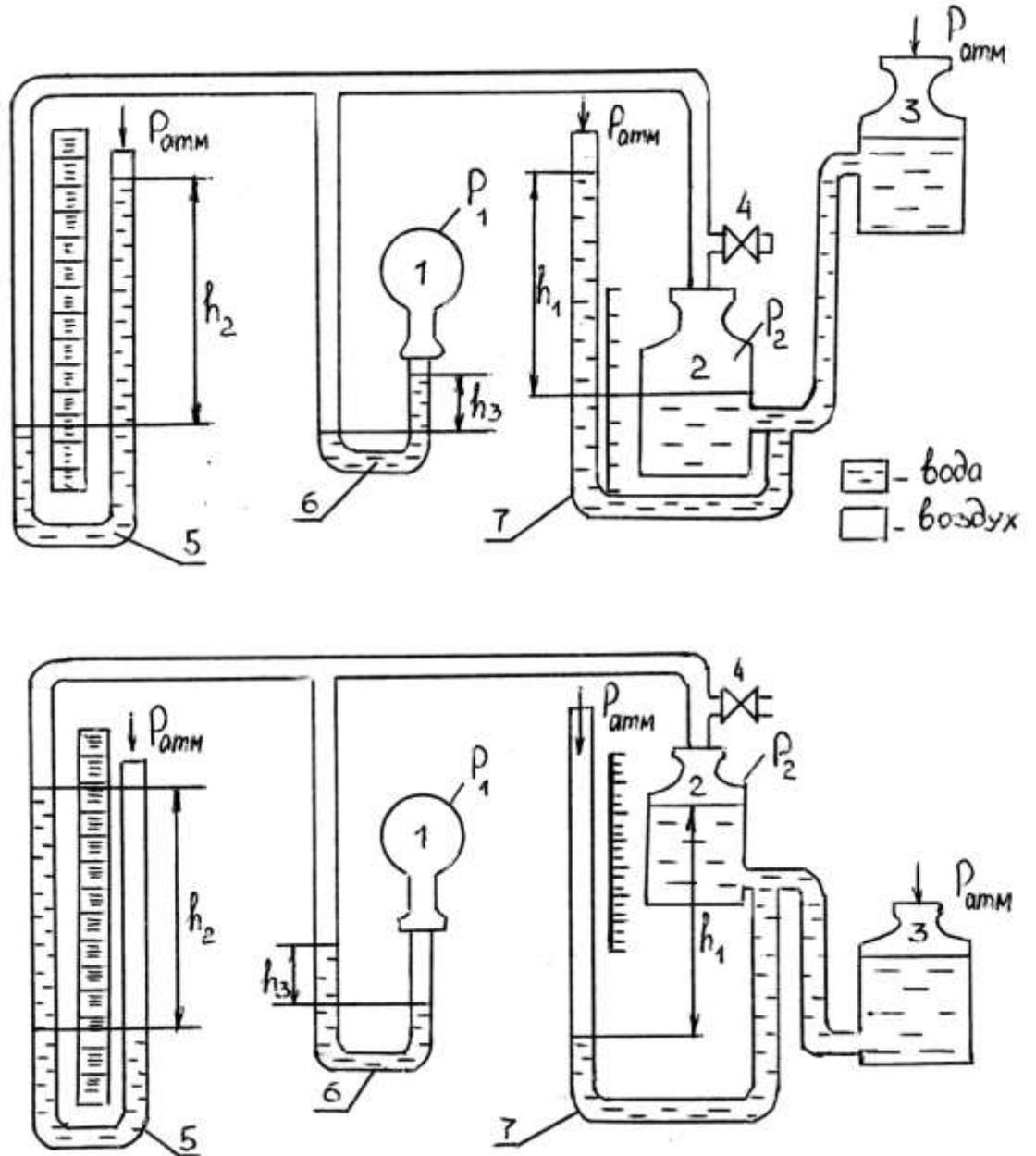


Рис. 1.2. Схема экспериментальной установки для различных положений сообщающихся сосудов: 1 – замкнутая полость; 2,3 – сообщающиеся сосуды; 4 – зажим; 5,6,7 – жидкостные манометры.

Экспериментальная установка представляет собой три емкости 1,2,3, соединенные между собой гибкими трубками, частично заполняемыми

водой. Ёмкость 3 имеет возможность перемещения по вертикали. Зажим 4 позволяет соединять систему с атмосферой. Соединительные гибкие трубы, стеклянные трубки и емкости 1,2,3 в совокупности образуют три U – образных манометра 5,6,7 с помощью которых можно измерить давление в различных точках системы.

### **Порядок выполнения работы.**

#### **1. Изучение сущности и свойств гидростатического давления, методов и средств измерения ГСД.**

При выполнении этого раздела необходимо, используя методические указания, рекомендуемую литературу, изучить сущность ГСД и его свойства, единицы измерения.

Изучив сущность ГСД и единицы его измерения, научиться выражать одно и то же значение ГСД в различных единицах на конкретных примерах.

Получить расчетную формулу для определения разности давлений  $\Delta P = P_1 - P_2$  с помощью дифференциального манометра со ртутью при определенном показании  $h$ .

Далее приступают к изучению методов и средств измерения ГСД. В процессе изучения (по методическим указаниям, рекомендуемой литературе и приборов для измерения ГСД в лаборатории) необходимо установить принцип действия, схему работы, область применения; вычертить схемы приборов и дать краткое описание с ответами на поставленные вопросы.

#### **2. Определение гидростатического давления в замкнутой области.**

Выполнение этого раздела работы осуществляется в следующем порядке:

2.1. Перемещением емкости 3 (рис.1.2) добиваются того, чтобы емкости 2 и 3 находились на одном уровне;

2.2. Открывают зажим 4 для того, чтобы внутри системы установилось давление равное атмосферному, после чего закрывают зажим 4;

2.3. Перемещают емкость 3 вверх и фиксируют в определенном произвольном верхнем положении. После того, как жидкость из емкости 3 перетечет в емкость 2, давление в системе изменяется. После восстановления равновесия в емкостях необходимо измерить высоты столбов жидкости (показания манометров)  $h_1, h_2, h_3$ .

2.4. Перемещают емкость 3 вниз и фиксируют в произвольном нижнем положении. После того как перетекание жидкости прекратится, т. е. восстановится равновесие в емкостях, снимают показания приборов  $h_1, h_2, h_3$ .

Все данные опытов заносят в журнал лабораторных работ.

### **Обработка экспериментальных данных.**

Используя результаты измерений, вычислить гидростатическое давление в емкости 2 ( $P_2$ ) и давление в емкости 1 ( $P_1$ ) для двух положений емкости 3.

Примечание: при вычислении  $P_2$  и  $P_1$  использовать уравнение (1.2)



## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.**

### **Исследование режимов движения жидкости в трубопроводе**

#### **Цель работы:**

1. Ознакомление путем визуального наблюдения с ламинарным и турбулентным режимами движения;
2. Определение числа Рейнольдса по экспериментальным данным при ламинарном и турбулентном режимах движения.

#### **Краткие теоретические сведения.**

Многочисленными экспериментами установлено, что одна и та же жидкость в одних случаях имеет струйчатое (ламинарное) движение, а в других случаях беспорядочное (турбулентное) движение.

Наличие ламинарного или турбулентного движения можно наблюдать по поведению подкрашенной струйки жидкости в прозрачной трубе: при ламинарном движении подкрашенная струйка течет, не смешиваясь с другими слоями (струйками) жидкости; при турбулентном – она интенсивно размывается вследствие пульсации скоростей.

Для момента перехода от одного режима к другому окрашенная струйка имеет ломаную, местами прерывистую форму очертания, наблюдаются зоны местного (локального) окрашивания потока, т.е. возникают «локальные пятна» турбулентности.

Выяснение вопроса о режимах движения связано с именами русского ученого Д.И. Менделеева и английского О. Рейнольдса.

Д.И. Менделеев в своей статье «О сопротивлении жидкостей и воздухоплавании» (1880 г.) установил наличие различных режимов движения жидкости с различными законами для потерь энергии на сопротивление при движении. Физическая характеристика условий, определяющих режимы давления жидкости, была выявлена О.Рейнольдсом (1883 г.). Он установил, что большая или меньшая степень турбулентности движения зависит от рода жидкости (вязкости), скоростей ее в трубопроводе, называемой числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho \cdot l}{\nu} \quad 2.1$$

где:  $\nu$  - некоторая характерная скорость (обычно средняя по течению);

$l$  - характерный линейный размер поперечного сечения;

$\nu$  - кинематический коэффициент вязкости.

В качестве параметра  $l$  для круглых труб принимается внутренний диаметр трубы  $d$ , реже радиус трубы  $r$ . Для каналов некруглого сечения – обычно величина гидравлического диаметра  $d$  или гидравлического радиуса  $R$ , причем гидравлический радиус определяется как отношение площади живого сечения потока  $S_k$  смоченному периметру  $x$ .

$$R = \frac{S}{X} \quad (2.2)$$

Гидравлический диаметр по аналогии с соотношением, получающимся для круглых труб, принимается равным четырем гидравлическим радиусам  $d=4R$ .

Изменить число Рейнольдса в трубе данного диаметра, заполненной определенной жидкостью, можно изменяя скорость течения жидкости  $v$  и расход  $Q$ .

В результате тщательно поставленных, неоднократно повторяющихся экспериментов, было определено критическое значение числа Рейнольдса, при котором происходит переход ламинарного режима в турбулентный. Для круглых труб значение критического числа Рейнольдса принято считать равным  $Re_{кр} = 2320$ .

При малых расходах режим течения может быть ламинарным, причем при числах Рейнольдса, меньших критического числа  $Re_{кр}$  любые возмущения, вносимые в поток, затухают, и сохраняется устойчивый ламинарный режим. Ламинарный режим может существовать при числах  $Re > Re_{кр}$ , в частности, при переходе от ламинарного течения к турбулентному, однако такое течение будет неустойчивым, и внесение любых возмущений приведет к турбулизации потока.

При определении числа Рейнольдса кинематический коэффициент вязкости  $\nu$  определяется по справочному пособию. Для воды  $\nu$  можно определить по формуле Пуазейля:

$$\nu = \frac{0,00179}{1 + 0,037 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2}, \text{ см}^2/\text{с} \quad (3.3)$$

где  $t$  – температура воды в градусах Цельсия.

Потери напора при обоих режимах движения могут быть выражены формулой:

$$h_f = k \cdot g^2 \text{ или } l g k_f = l g k + m \cdot l g g \quad (3.4)$$

При ламинарном режиме  $m = 1$  коэффициент « $k$ » зависит от вязкости жидкости, диаметра трубопровода и его длины и не зависит от шероховатости.

При турбулентном режиме  $1 < m \leq 2$  и « $k$ » зависит еще от поверхности стенок  $\Delta$ . В общем  $k = f(Re, \Delta, d, l)$ .

График  $h_f = f(g)$  в логарифмических координатах называется логарифмическим. По этому графику наглядно видно, как меняются потери в функции скорости. Так, для ламинарного движения  $h = f(g)$  т.е.  $m = 1$ . С увеличением скорости при переходе ламинарного в турбулентный режим эта линейность нарушается, степенной показатель растет до 2 (при турбулентном движении).

### Описание экспериментальной установки.

Экспериментальная установка для исследования режимов движения (рис. 2.1) включает: напорный бак 1 с переливным устройством (сливом) 6 для поддержания постоянного напора, стеклянную трубку 2 с краном на конце 3. Вода подается в напорный бак по трубе 9, расход подачи регулируется краном 10.

В стеклянную трубку 2 введена капиллярная трубка, по которой подается подкрашенная жидкость из сосуда 4. Расход трубки регулируется краном 5.

Измерение объема вытекающей жидкости определяется объемным способом. На слив подводят мензурку  $W = 1000 \text{ см}^3$ .

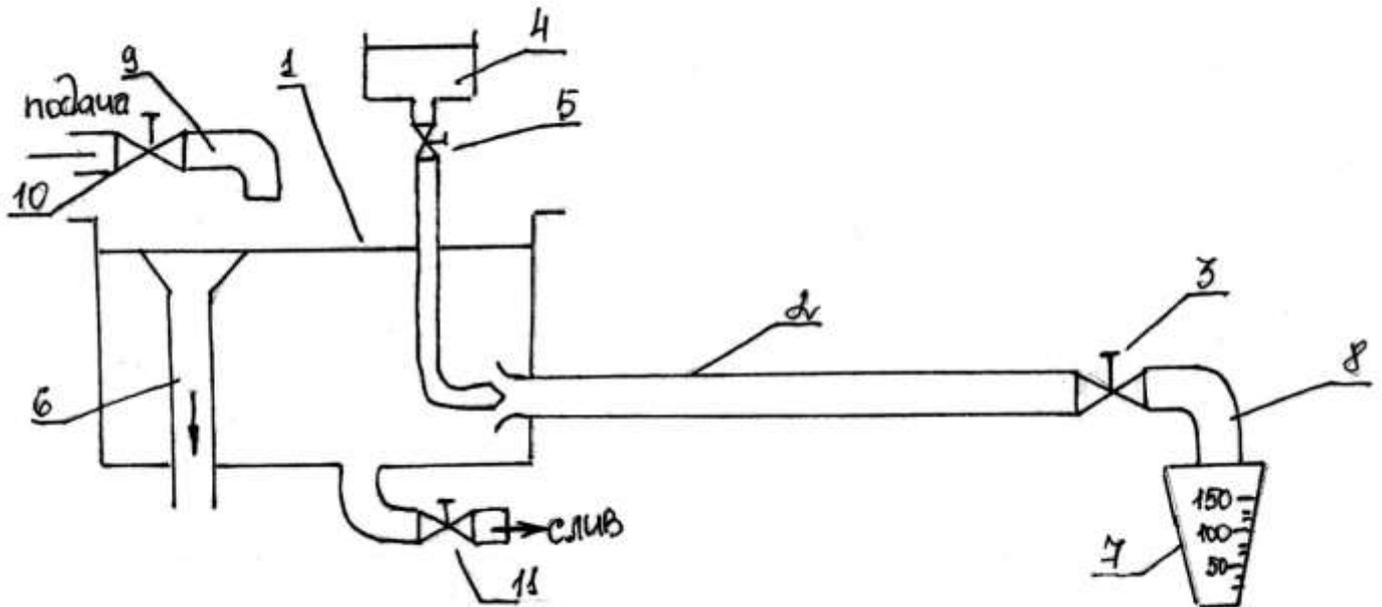


Рис.2.1. Схема экспериментальной установки:

- 1 –напорный бак; 2 – стеклянная труба; 3,5,10,11 – краны ;
- 4 – сосуд с подкрашенной жидкостью; 6 – слив, (ограничитель уровня);
- 7 – мерная емкость, 8 – сливная труба.

### Порядок выполнения работы.

Открывая краны 10 и 3, устанавливают постоянство напора в напорном баке 1, при этом через переливное устройство 6 должен происходить слив воды тонким слоем и уходить по сливной трубе 8.

Открывают краник 5 и вводят в стеклянную трубу 2 подкрашенную жидкость.

Регулируя расход воды в стеклянной трубе 2 краном 3, добиваются ламинарного режима движения.

Установив ламинарный режим движения, снимают показания, т.е. делают необходимые замеры: расход воды стеклянной трубе 2 (объемным способом), температуру воды.

Открывая постепенно кран 3 и увеличивая тем самым расход воды и, следовательно, скорость течения в стеклянной трубе 2, устанавливают момент перехода от ламинарного режима к турбулентному.

Установить таким же путем турбулентный режим и измерить расход воды трубы 2.

Все данные опыты заносят в журнал лабораторных работ.

### **Обработка опытных данных.**

При обработке опытных данных вычисляются:

-расход воды  $Q=W/t$ ,

-средняя скорость течения в трубе 2 
$$g = \frac{Q}{S}$$
,

-число Рейнольдса

$$Re = \frac{g \cdot d}{\nu}$$

Коэффициент  $\nu$

Результаты вычислений заносят в журнал лабораторных работ и делается анализ соответствия полученных результатов литературным данным.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

#### Экспериментальное исследование уравнения Д. Бернулли.

##### Цель работы:

1. Экспериментальная демонстрация уравнения Д. Бернулли;
2. Построение по результатам измерений пьезометрической и напорной линий;
3. Определение потерь напора и энергии на различных участках трубопровода и характера изменения полной и потенциальной энергии потока по его длине.

##### Краткие теоретические сведения.

Основным уравнением гидродинамики, устанавливающим связь между высотными положениями двух сечений ( $Z_1$  и  $Z_2$ ), средними скоростями движения ( $v_1$  и  $v_2$ ), гидродинамическими давлениями в них ( $P_1/\rho g$  и  $P_2/\rho g$ ) при установившемся плавно изменяющемся движении является уравнение Бернулли, написанное для двух сечений 1-1 и 2-2 в отношении какой либо горизонтальной плоскости 0-0 (рис.3.1).

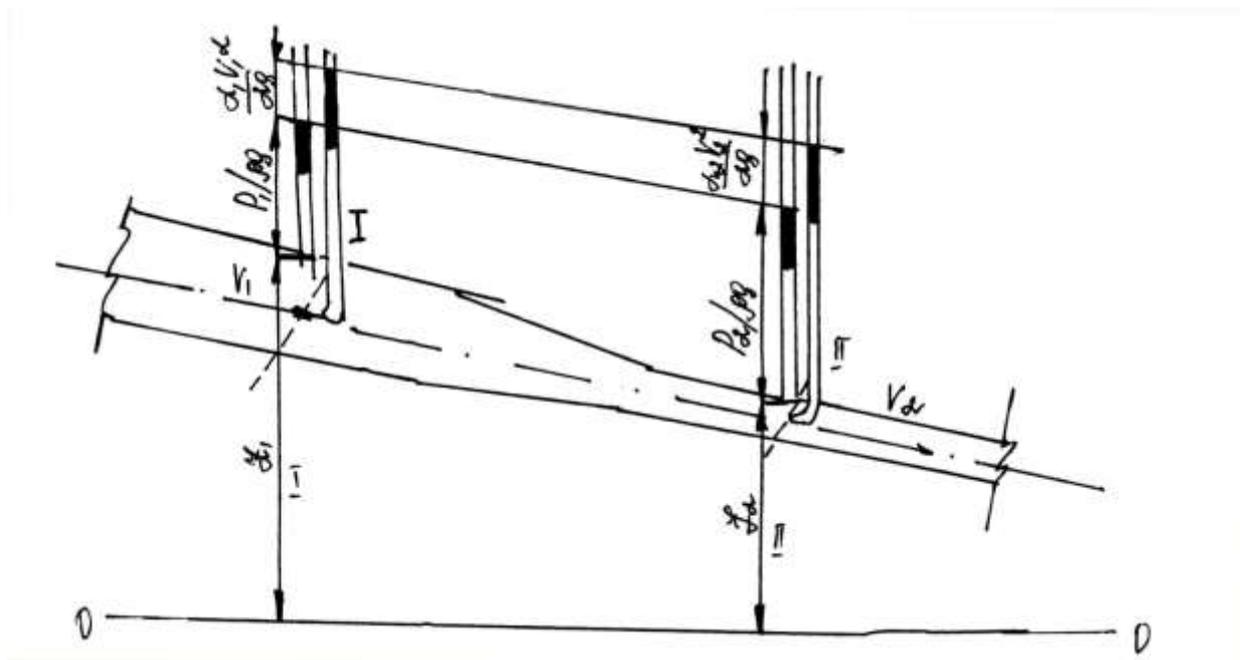


Рис.3.1. Расчетная схема уравнения Бернулли.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{1-2} \quad (3.1)$$

или

$$E_1 = E_2 + E_{\text{пот } 1-2}$$

Уравнение Бернулли выражает, что энергия потока приходящаяся на единицу веса протекающей жидкости – удельная энергия  $E_1$  в первом

сечении, равна удельной энергии, во втором сечении –  $E_2$ , сложенной с потерей удельной энергии  $E_{\text{ПОТ}1-2}$  на участке между сечениями 1-2.

Удельная энергия потока состоит из:

- а) удельной энергии положения частицы  $Z$  относительно какой либо плоскости сравнения 0-0;
- б) удельной энергии давления  $P/\rho g$  для той же точки сечения; при этом  $Z + P/\rho g$  представляют собой удельную потенциальную энергию относительно плоскости сравнения 0-0;
- в) удельной кинетической энергии  $\frac{\alpha v^2}{2g}$ , где  $\alpha$  коэффициент кинетической энергии, учитывающий распределение скоростей (неравномерность) по сечению потока.

Уравнение Бернулли так же представляют в следующем виде:

$$H_1 = H_2 + h_{1-2} \quad (3/3)$$

показывающем, что гидродинамический напор  $H_1$  в первом сечении равен гидродинамическому напору  $H_2$  во втором сечении, сложенному с потерей напора  $h_{1-2}$  участке между первым и вторым сечением.

Гидродинамический напор потока в данном сечении состоит из:

- а) пьезометрического напора, взятого относительно плоскости сравнения и равного  $Z + P/\rho g$ , где  $Z$  – координата любой точки данного сечения или геометрическая высота, а  $P/\rho g$  – пьезометрическая высота гидравлического давления в этой точке;
- б) скоростного напора  $\frac{\alpha v^2}{2g}$ .

Для характеристики изменения напора вдоль трубопровода строят:

- а) линию гидродинамического напора – напорную линию;
- б) линию пьезометрического напора или пьезометрических высот – пьезометрическую линию.

Напорная линия является линией полной удельной энергии потока, пьезометрическая линия является линией полной потенциальной энергии потока, определяемой относительно выбранной плоскости сравнения (рис 3.1).

Для трубопровода переменного сечения с горизонтальной осью при плоскости сравнения, лежащей на уровне этой оси, и точках отсчета, взятых на оси трубопровода ( $Z=0$ ), уравнение Бернулли в случае потока невязкой жидкости ( $h_{\text{ТР}}=0$ ) будет иметь вид:

$$Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} = \text{const} \quad (3.4)$$

Откуда следует, что чем больше средняя скорость в сечении, тем меньше давление в нем.

Используя уравнение расхода:  $Q = S \cdot v$ ;  $v = Q/S$ , получим:

$$H = P/\rho g + \alpha Q^2/2gS^2 = \text{const} \quad (3.5)$$

Из уравнения (3.5) следует, что чем больше сечение трубопровода, тем больше в нем манометрическое давление, и наоборот (рис. 3.1).

При сильно суженном сечении и значительной скорости в нем манометрическое давление может стать отрицательным, т.е. в суженном сечении будет вакуум  $P_{\text{ВАК}}$ . Если поставить в суженном сечении обратный пьезометр, то вода в трубке его поднимет на высоту:

$$P_{\text{ВАК}}/\rho g = h_{\text{ВАК}} = P_0/\rho g - P/\rho g, \quad (3.6)$$

где  $P_0$  – атмосферное давление;

$P$  – давление в суженном сечении.

Если уровень воды в сосуде, куда опущен открытый конец обратного пьезометра, будет находиться на расстоянии меньшем, чем  $h_{\text{ВАК}}$ , то из сосуда вода будет поступать в трубопровод. На этом принципе построены приборы для подъема жидкостей (водоструйные насосы), применяемые для отсасывания жидкости, нагнетания, а так же для подъема жидкостей и грунта (гидроэлеваторы).

При равномерном движении вязкой жидкости в трубопроводе покрытие напора будет происходить за счет потенциальной энергии – уменьшения пьезометрического напора.

Напорная линия при движении невязкой жидкости горизонтальна, при движении вязкой жидкости всегда наклонена в сторону движения жидкости. Падение напорной линии на единицу длины называется гидравлическим уклоном, он всегда положителен.

Пьезометрическая линия при движении невязкой жидкости на участках трубопровода с постоянной площадью сечения горизонтальна, на сужающихся участках – кривая с падением в сторону движения, на участках расширяющихся – с подъемом в сторону движения.

При движении вязкой жидкости пьезометрическая линия на участках трубопровода с постоянным сечением - наклонная в сторону движения и прямая, на сужающихся участках – кривая, с падением в сторону движения, на расширяющихся – кривая, ее наклон может быть в сторону движения или обратный, в зависимости от характера расширения.

Падение пьезометрических линий на единицу длины называется пьезометрическим уклоном; он может быть и положительным и отрицательным.

### **Описание экспериментальной установки.**

Экспериментальная установка, принципиальная схема которой представлена на рис.3.2, состоит из напорного бака 3, к которому присоединен трубопровод 8 переменного сечения с коническими переходами. Вода в бак 3 поступает по трубопроводу от насосной установки 1. Регулирование расхода в бак по трубопроводу 8 осуществляется вентилем 5,9. Стабилизация уровня в баке осуществляется сливом 4.

Трубопровод 8 оснащен штуцерами, к которым присоединены трубки 6,7 батарейного пьезометра. Измерение расхода осуществляется объемным способом при помощи мерной емкости 11, оборудованной пьезометром 12 и клапаном 10.

### Порядок выполнения работы.

Работа начинается с ознакомления с установкой. При этом записываются диаметры сечений трубопровода  $d_i$ , расстояния между ними  $l_i$ , координаты  $Z_i$  сечений трубопровода. Записи производятся в журнале лабораторных работ.

Для получения опытных данных для построения напорной, пьезометрической линии и для качественной оценки потерь и определения уклонов (пьезометрического и гидравлического) необходимо:

а) включить насос 1 для подачи воды в напорный бак 3, уровень воды в котором будет поддерживаться постоянным за счет сброса излишней воды через слив 4;

б) открыть вентили 5 и 9 и произвольно отрегулировать расход воды, учитывая лишь верхние пределы пьезометров;

в) подождать, пока движение станет установившемся, что видно по неизменности уровней в пьезометрах;

г) убедиться в правильности показаний пьезометров 6 и трубок Пито 7 (попадание пузырьков воздуха в резиновые и стеклянные трубки пьезометров нарушает правильность их показаний);

д) записать показания пьезометров и трубок Пито в журнал;

е) для определения расхода  $Q$  перекрыть клапаном 10 отток воды из мерного бака 11, засечь время  $t$  заполнения мерного бака; вычислить объем воды как произведение площади поперечного сечения мерного бака и слоя воды, поступившей в мерный бак за время  $t$ :  $W = S \cdot h_{М.Б.}$

Все измерения производят 2-3 раза, В случае получения значительных (более 5%) расхождений между двумя замерами, их повторяют.

Все замеры заносят в журнал лабораторных работ.

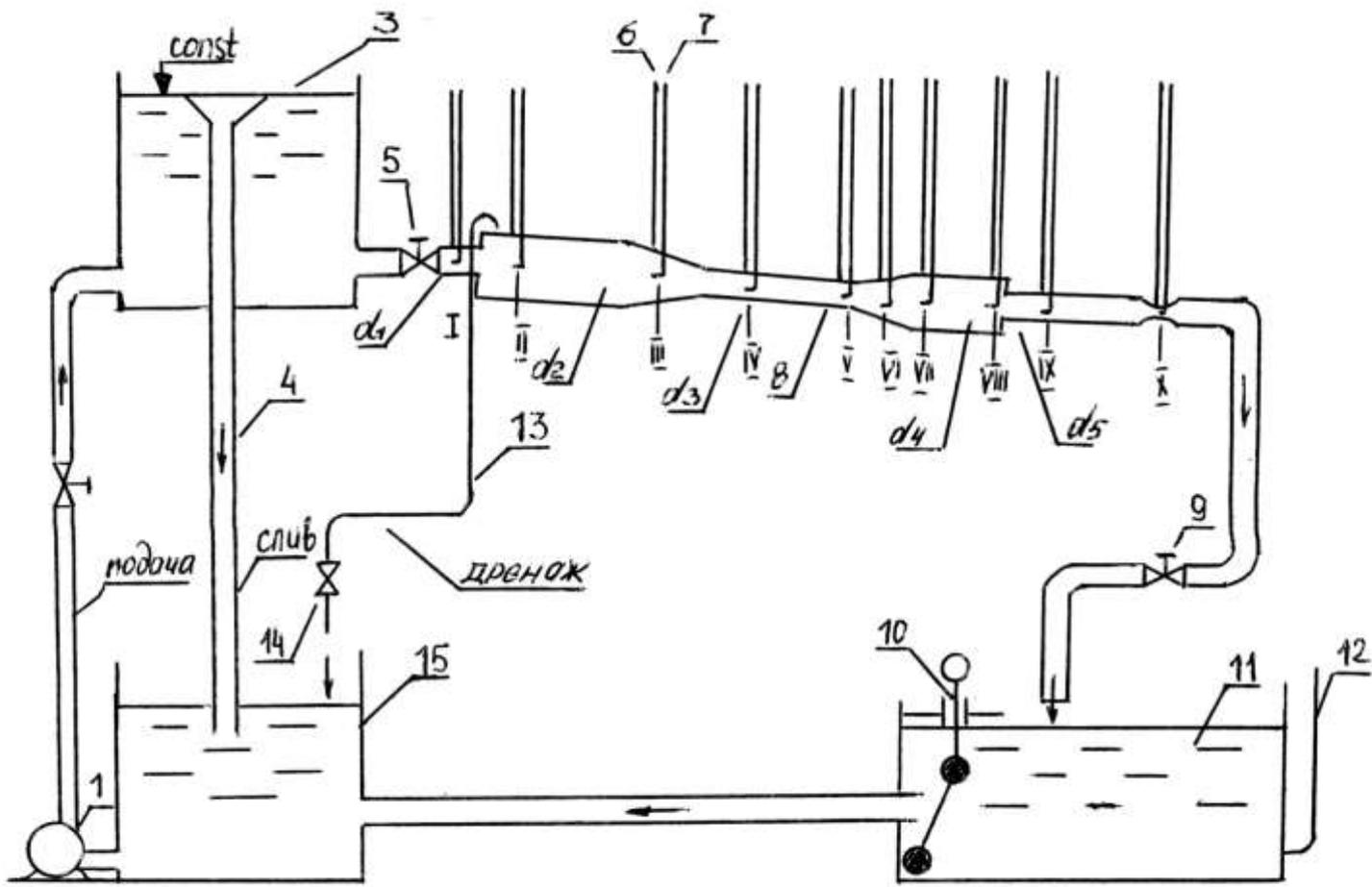


Рис3.2. Схема экспериментальной установки:  
 1 – насос; 2,5,9 – вентили; 3 – напорный бак; 4 – слив; 6,12 – пьезометры; 7 – гидродинамическая трубка; 8 – трубопровод; 10 – клапан; 11 – мерная емкость; 13 – дренажная трубка; 14 – зажим; 15 – резервуар.

### Обработка экспериментальных данных.

Обработка результатов опытов состоит:

1. В определении площадей живых сечений  $S_i$  трубопровода в местах установки пьезометров.
2. В определении средней скорости в отдельных сечениях по формуле:  $v_i = \frac{Q}{S_i}$
3. В установлении потерь напора  $h$  между сечениями по всей трубе
4. В определении пьезометрического и гидравлического уклонов для отдельных участков и всего трубопровода.

По результатам обработки вычерчиваются пьезометрическая и напорная линии. Проводится проверка правильности их (напорная линия на всех участках должна иметь положительный уклон) и делается качественная оценка потерь напора на отдельных участках и анализ.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.**  
**Исследование истечения жидкости**  
**через малое отверстие в тонкой стенке и насадки**

**Цель работы:** Экспериментальное изучение истечения жидкости под постояннымнапором в атмосферу через малое отверстие в тонкой стенке и через насадки и определение гидравлических коэффициентов скорости  $\phi$ , расхода  $\mu$ , сжатия  $\varepsilon$ , сопротивления  $\zeta$ .

**Краткие теоретические сведения:**

а) **Истечение жидкости через малые отверстия в тонкой стенке.**

Малым отверстием считается такое, поперечные размеры которого малы по сравнению с напором ( $d < 0,1H$ ), вследствие чего скорости в различных точках отверстия можно считать одинаковыми.

Стенка считается тонкой, если вытекающая струя соприкасается с кромкой отверстия, обращенной внутрь сосуда, и не касается боковой поверхности отверстия.

При истечении из отверстия происходит сжатие струи, величина которого характеризуется коэффициентом сжатия  $\varepsilon$  :

$$\varepsilon = S_c / S \quad (7.1)$$

где  $S_c$  - площадь живого сечения в сжатом сечении;

$S$  - площадь сечения отверстия.

Сжатие будет совершенным, когда на него не оказывают влияния стенки резервуара (сосуда). Для этого стенки резервуара должны быть удалены от кромок отверстия на расстояние  $l_1 > 3a$  и  $l_2 > 3b$  (рис. 7.1.)

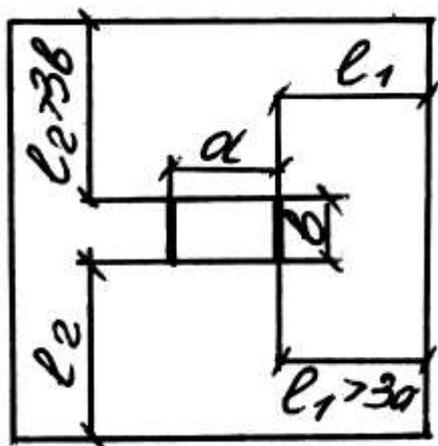


Рис. 7.1. Схема размещения отверстия в тонкой стенке.

При невыполнении этих условий, сжатие будет несовершенным - коэффициент сжатия  $\varepsilon$  увеличится.

Сжатие будет полным, когда струя испытывает сжатие по всему периметру отверстия. Неполное сжатие будет, когда на части периметра отверстия сжатие отсутствует, вследствие того, что к кромке отверстия примыкает стенка, что ведет к увеличению коэффициента сжатия.

При полном сжатии различают совершенное и несовершенное сжатие.

Совершенное сжатие характеризуется наибольшей кривизной траекторий крайних струек вытекающей струи и соответственно максимальным сжатием струи.

При несовершенном сжатии кривизна траекторий частиц вблизи отверстия меньше, чем при совершенном сжатии. В связи с этим сжатие по соответствующей стороне (близко расположенной к направляющей поток стенке или дну) уменьшается. Следовательно, площадь сжатого сечения при несовершенном сжатии и при прочих равных условиях больше, чем при совершенном сжатии.

Струя при выходе из отверстия в боковой стенке не сохраняет форму отверстия. При истечении из круглого отверстия вблизи него струя имеет форму эллипса. Форма струи, вытекающей из квадратного отверстия, по мере удаления от него, меняется, и квадратное сечение струи переходит в крестообразное. Явление изменения формы струи получило название *инверсии струи*.

Траекторией струи называют ось струи жидкости, свободно падающей после истечения из отверстия.

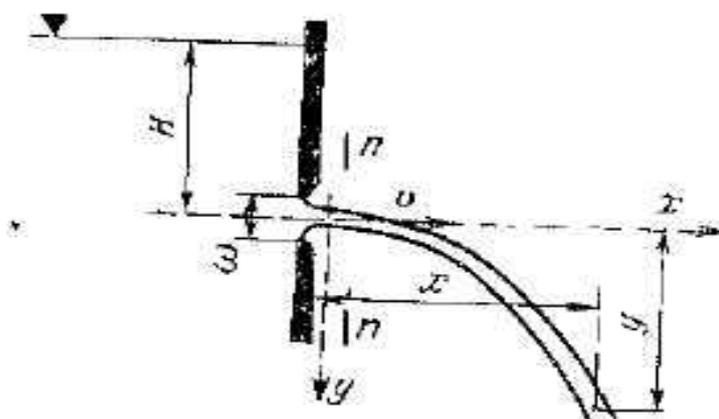


Рис.7.2.

Уравнение осевой линии струи (рис.7.2):

$$y = \frac{g \cdot x^2}{2 \cdot g^2} \quad \text{или} \quad y = \frac{x^2}{4 \cdot \varphi^2 \cdot H}, \quad (7.2)$$

где расстояние  $x$  называется дальностью отлета струи и определяется из формулы (7.2):

$$x = 2 \cdot \varphi \cdot \sqrt{H \cdot y}$$

Скорость в сжатом сечении  $v_c$  при истечении находится из уравнения Бернулли, написанного для сечений I-I (рис. 7.3.), взятого на поверхности жидкости, где давление известно, и II-II, взятого в сжатом сечении относительно плоскости сравнения 0-0, проведенной через центр тяжести сечения струи.

$$H + \frac{P_0}{\rho g} + \frac{\alpha g_0^2}{2g} = \frac{P_c}{\rho g} + \frac{\alpha g_c^2}{2g} + \xi_{г.ст.} \cdot \frac{g_c^2}{2g} \quad (7.3)$$

где  $H$  - напор над центром отверстия;

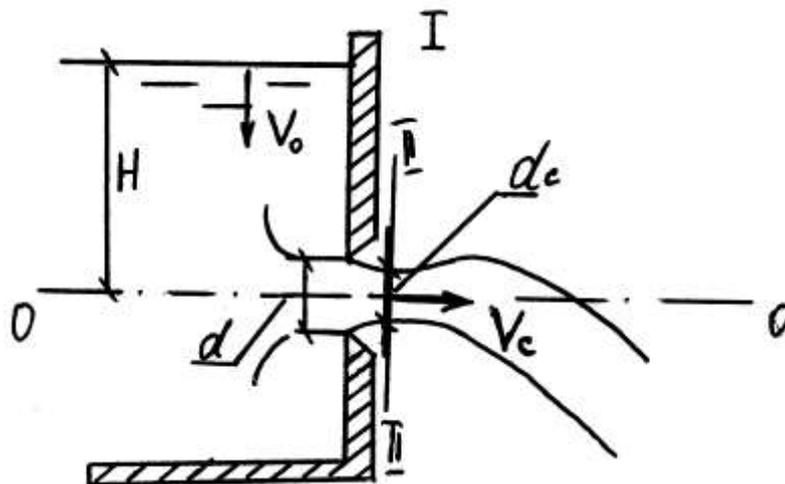
$P_0$  - давление на свободной поверхности жидкости, для открытого резервуара  $P_0 = P_{ATM}$ ;

$P_C$  - давление в сжатом сечении, равно атмосферному  $P_{ATM}$ ;

$g_0$  - средняя скорость в сечении I-I;

$g_c$  - средняя скорость в сжатом сечении;

$\xi_{т.ст.}$  - коэффициент сопротивления



стенки.

Рис. 7.3. Схема истечения из отверстия в тонкой стенке.

Из уравнения Бернулли (7.3) получим:

$$g_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_{т.ст.}}} \sqrt{2g \left( H_0 + \frac{P_0 - P_{ATM}}{\rho g} \right)} = \varphi \sqrt{2g \left( H_0 + \frac{P_0 - P_{ATM}}{\rho g} \right)} \quad (7.4)$$

где  $\varphi$  - коэффициент скорости, учитывающий уменьшение скорости

вследствие наличия сопротивлений при истечении потока из отверстия и представляющий собой отношение действительной скорости к скорости теоретической, полученной при отсутствии потерь;

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_{т.ст.}}}$$

$\alpha$  - коэффициент неравномерности распределения скоростей, принимается равным единице;

$$H_0 = H + \frac{g_0^2}{2g} \quad (7.5)$$

Расход жидкости при истечении из отверстия определяется по формуле:

$$Q = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2g \left( H_0 + \frac{P_0 - P_{ATM}}{\rho g} \right)} \quad (7.6)$$

где  $\mu$  - коэффициент расхода,  $\mu = \varepsilon \varphi$ .

При истечении из открытого резервуара  $P_0 = P_{ATM}$  и при значительной площади сечения резервуара  $g_0 = 0$ , напор истечения будет равен  $H$  и тогда расход истечения определится по формуле:

$$Q = \mu S \sqrt{2gH} \quad (7.7)$$

б) Истечение жидкости через насадки,

Насадком называется короткая труба  $l = (3...4)d$ , присоединенная к отверстию для получения струи с новыми гидравлическими характеристиками: большим расходом, большей или меньшей кинетической энергией и т.д.

Насадки подразделяются на внешние и внутренние, которые, в свою очередь, делятся на цилиндрические, конические (расходящиеся и сходящиеся) и коноидальные (с криволинейными образующими, очерченными по форме, вытекающей из отверстия струи), рис.7.4.

При движении жидкости в цилиндрическом насадке образуется сжатое сечение, в области которого наблюдается вакуум. В связи с этим происходит как бы «подсасывание» жидкости, что увеличивает пропускную способность отверстия.

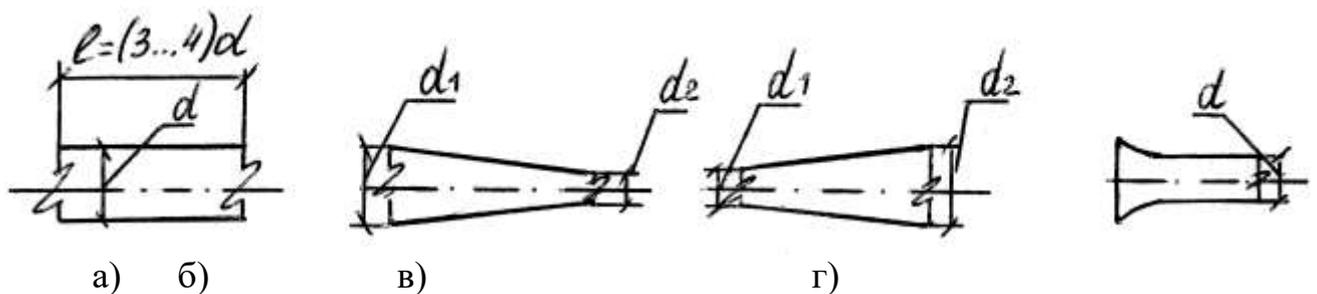


Рис. 7.4. Схемы насадков: а) цилиндрический; б) конически, сходящийся; в) конически расходящийся; г) коноидальный.

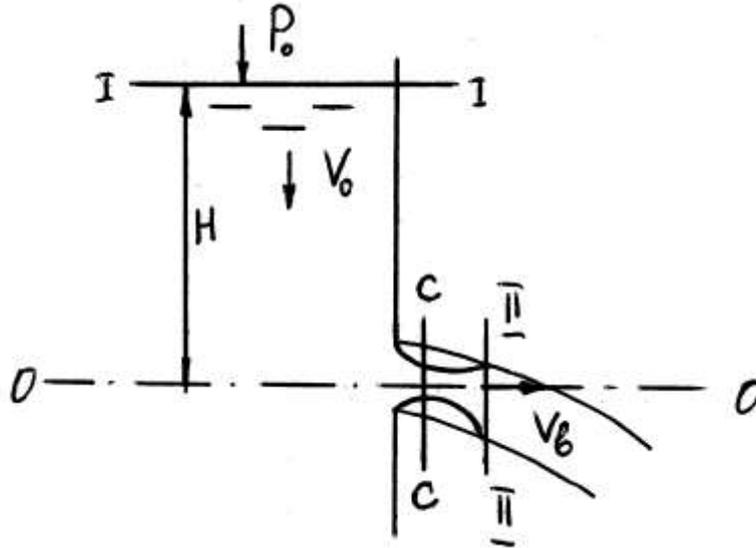
Величина скорости в выходном сечении насадка находится из уравнения Бернулли, написанного для сечения I-I, на поверхности жидкости резервуара и выходного сечения II-II при плоскости сравнения 0-0, совпадающей с осью насадка:

$$H + \frac{P_0 + P_{ATM}}{\rho g} + \frac{g_0^2}{2g} = \frac{g_b^2}{2g} + \xi_c \frac{g_b^2}{2g} \quad (7.8)$$

где  $H + \frac{P_0 + P_{ATM}}{\rho g} + \frac{g_0^2}{2g} = H_0$  - полный напор над центром насадка (с учетом скорости подхода)

$g_b$  - скорость в выходном сечении;

$\xi_c$  - суммарный коэффициент потерь в



насадке.

Рис. 7.5. Схема истечения из цилиндрического насадка.

При определении суммарного коэффициента потерь  $\xi_c$  учитываются коэффициенты:

- а) потери при выходе в отверстие ( $\xi_{вх} = \xi_{т.ст.}$ );
- б) потери на внезапное расширение струи в насадке ( $\xi_{в.р.}$ );
- в) потери на трение по длине насадки ( $\xi_{дл}$ ), следовательно:

$$\xi_c = \xi_{т.ст.} + \xi_{в.р.} + \xi_{дл} \quad (7.9)$$

где  $\xi_{дл}$  как известно равен  $\lambda \frac{l}{d}$ .

При этом все коэффициенты должны быть отнесены к скорости в выходном сечении.

Из уравнения (7.8) получим:

$$g_b = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi_{т.ст.} + \xi_{в.р.} + \frac{\lambda}{l \cdot d}}} \sqrt{2g \left( H + \frac{g_0^2}{2g} \right)} = \varphi \sqrt{2gH_0} \quad (7.10)$$

где  $\frac{1}{\sqrt{1 + \xi_{т.ст.} + \xi_{в.р.} + \frac{\lambda}{l \cdot d}}} = \varphi$  - коэффициент скорости.

Так как жидкость из цилиндрического насадка вытекает полным сечением, то коэффициент сжатия струи для этого насадка  $\varepsilon=1$ . Поэтому коэффициент расхода  $\mu$  при истечении через цилиндрический насадок равен:

$$\mu = \varepsilon \varphi = \varphi \quad (7.11)$$

При истечении из открытого резервуара  $P_0 = P_{атм}$  и при значительной площади сечения резервуара  $v_0=0$  напор истечения, как и в случае истечения из отверстия, будет равен  $H$  и тогда расход истечения определится по формуле:

$$Q = \mu \cdot S_b \sqrt{2gH} \quad (7.12)$$

где  $S_b$ - площадь выходного сечения насадка.

Величина вакуума в сжатом сечении насадка определяется из уравнения Бернулли, написанного для сжатого и выходного сечений относительно плоскости сравнения  $0 - 0$ , совпадающей с осью насадка.

$$\frac{P_c}{\rho g} + \frac{g_c^2}{2g} = \frac{P_{ATM}}{\rho g} + \frac{g_b^2}{2g} + \xi' \frac{g_b^2}{2g} \quad (7.13)$$

где  $P_c$ - давление в сжатом сечении;

$g_c$  - скорость в сжатом сечении;

$\xi'_1$  - суммарный коэффициент потерь, при пренебрежении потерь на трение по длине, учитывающий потери на внезапное расширение.

$$\xi'_1 = \left( \frac{S_b}{S_c} - 1 \right)^2 = \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 = \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^2} \quad (7.14)$$

где  $S_c$  - площадь сжатого сечения в насадке.

Величина вакуума  $h_{BAK}$  с учетом (7.14) из уравнения (7.13) будет равна:

$$\frac{P_{ATM} - P_c}{\rho g} = h_{BAK} = \frac{g_b^2}{2g} \left[ \frac{1}{\varepsilon^2} - 1 - \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^2} \right] = \frac{2(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \frac{g_b^2}{2g}, \text{ при } g_c = g_b \cdot \frac{1}{\varepsilon} \quad (7.15)$$

Подставляя в (7.15) значение  $g_b$  из (7.10), получим:

$$h_{BAK} = 2\varphi^2 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} H \quad (7.16)$$

При истечении из конически расходящегося насадка, рассуждая аналогично вышеизложенному, можно доказать, что вакуум в насадке будет больше, расход истечения выше, чем в цилиндрическом, скорость на выходе будет меньше; в конически сходящемся, наоборот, расход истечения будет меньше, но скорость - выше. В коническом, в силу наименьших потерь, будет самый высокий коэффициент расхода (он достигает 0,98), а следовательно, и самый большой расход истечения.

Учитывая это обстоятельство, и подбирают насадки. Например, дальнеструйные насадки дождевальнх машин, пожарные брандспойты принимают конически сходящимися и т.д.

### **Описание экспериментальной установки.**

Экспериментальная установка (рис. 7.6) включает напорный бак 1 со сливом – сбросной трубой 2, в дне которого устроены: отверстие в тонкой стенке 3 и различные насадки 4,5 (цилиндрический и конически сходящийся). Напорный бак 1 питается насосом 11, подавая воду по трубопроводу 13, на котором установлен вентиль 12. Установка оснащена устройством для измерения расхода - мерной емкостью 6 с пьезометром 7 и клапаном 8. Установка работает в замкнутом цикле. Насос 11 забирает воду из резервуара 10, соединенного с мерной емкостью 6 трубой с задвижкой 9, в которую вода поступает из бака 1 через испытываемые отверстия и насадки 3, 4, 5, а также слив 2.

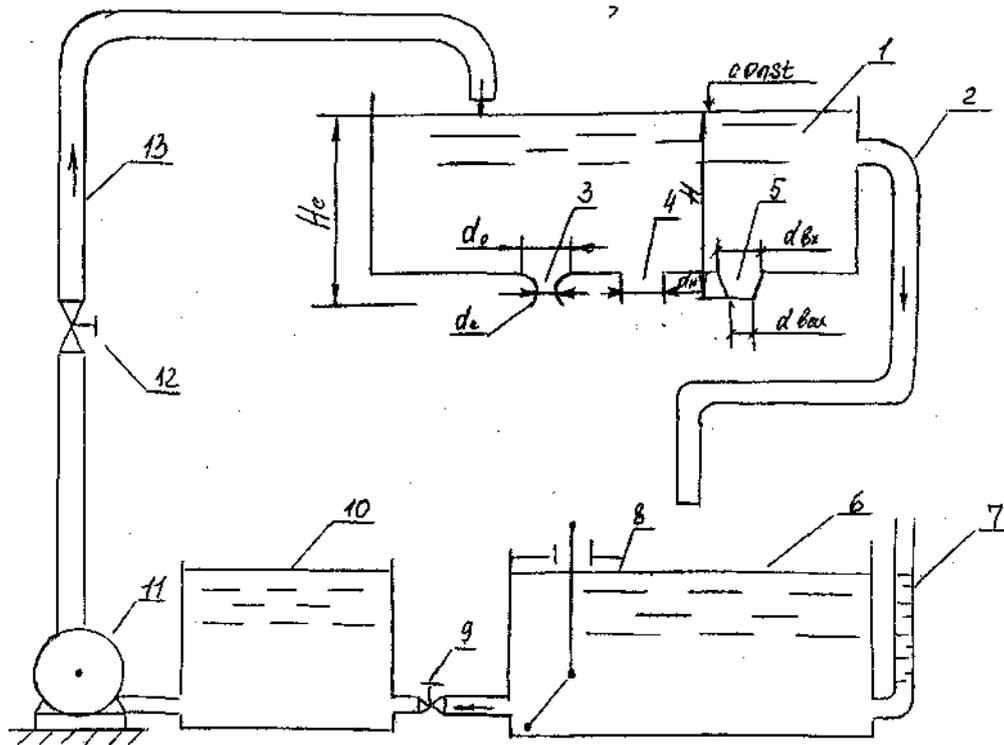


Рис. 7.6. Схема экспериментальной установки: 1 - напорный бак; 2 - слив; 3 - отверстие в тонкой стенке; 4 - цилиндрический насадок; 5 - конический сходящийся насадок; 6 - мерный бак; 7 - пьезометр; 8 - клапан; 9, 12 - вентили; 10 - резервуар; 11 - насос; 13 - питающий трубопровод.

### Порядок выполнения работы.

1. Готовят установку к работе, для чего открывают задвижку 9, открывают отверстие 3, перекрывают насадки 4, 5, затем запускают насос 11, и, вентилем 12 регулируют подачу, добиваясь стабилизации уровня воды в напорном баке 1 (в слив 2 вода должна поступать тонким слоем).

2. Производят замеры: напор истечения  $H$ , расход истечения из отверстия  $Q$  объемным способом (при помощи мерной емкости 6, которая при этом должна быть перекрыта клапаном 8), диаметр сжатого сечения  $d_c$ .

3. Перекрывают отверстие 3, открывают насадок 4 и опыт проводится в той же последовательности. Только здесь не снимается значение  $d_c$ , т.к. насадок на выходе работает полным сечением и  $\epsilon=1$ .

Аналогично проводится опыт и с другим насадком. Все данные измерений заносятся в журнал лабораторных работ.

### Обработка опытных данных.

Обработка опытных данных сводится к вычислению расхода истечения  $Q=W/t$ , площадей сечений отверстия и выходных сечений насадков. (Для цилиндрического сечения на входе и выходе одинаковы), скоростей истечения  $g$ ,  $g_c$ , коэффициентов  $\epsilon$ ,  $\phi$ ,  $\mu$  по приведенным выше формулам.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5.

### Исследование коэффициента сопротивления трения по длине при турбулентном напорном движении в трубопроводе

#### Цель работы:

1. Изучение потерь напора по длине и определение по экспериментальным данным коэффициента сопротивления трению по длине  $\lambda$  при напорном установившемся равномерном движении воды в трубопроводе;
2. Сравнение полученного значения  $\lambda$  с его значением, вычисленным по эмпирическим формулам, и установление сходимости результатов.

#### Краткие теоретические сведения.

Потери напора (энергии) по длине (путевые) определяются из уравнения Бернулли, записанного в двух контрольных сечениях (рис. 5.1.)

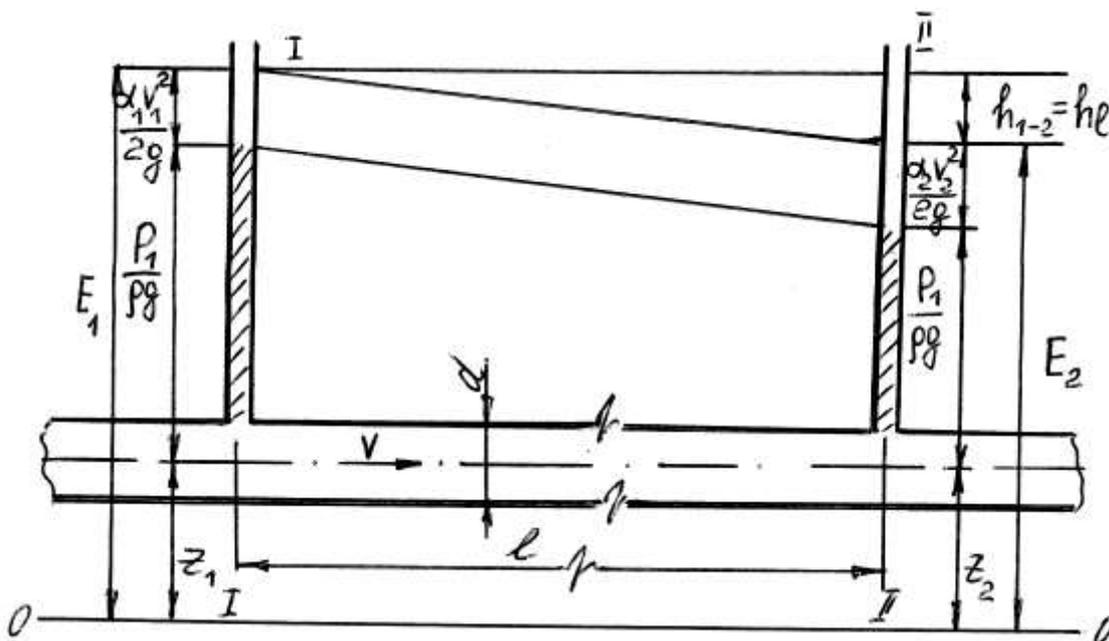


Рис. 5.1. Схема размещения контрольных створов и диаграммы уравнения Бернулли.

$$h_l = h_{1-2} = \left( Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left( Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) \quad (5.1.)$$

или

$$h_l = E_1 - E_2 \quad (5.2)$$

где  $h_l = h_{1-2}$ - путевые потери напора (энергии),

$E_1; E_2$ - удельная энергия в первом и втором сечении трубопровода.

В случае горизонтальной трубы ( $Z_1 = Z_2 = Z$ ) и постоянного диаметра трубопровода по длине ( $\vartheta_1 = \vartheta_2 = \vartheta$ ) путевые потери принимают вид:

$$h_l = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} \quad (5.3)$$

т.е.  $h_f$  равно разности пьезометрических напоров в контрольных сечениях I-I и II-II.

Практически потери напора в напорном трубопроводе определяются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{g^2}{2g} \quad (5.4)$$

где  $\lambda$  - коэффициент сопротивления трения по длине;

$l$  - длина трубопровода между двумя контрольными сечениями, м

$g$  - средняя скорость, м/с;

$g$  - ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

Коэффициент  $\lambda$  зависит от двух безразмерных параметров, числа Рейнольдса  $Re = \frac{g \cdot d}{\nu}$  и относительной шероховатости  $\frac{\Delta_{ЭКВ}}{d}$ , т.е.

$$\lambda = f\left(Re; \frac{\Delta_{ЭКВ}}{d}\right) \quad (5.5)$$

где  $\Delta_{ЭКВ}$  - эквивалентная шероховатость.

При турбулентных течениях в напорных трубопроводах для определения коэффициента  $\lambda$  рекомендуется формула Альтшуля А.Д.

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta_{ЭКВ}}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (5.6)$$

Для гидравлических гладких труб ( $\delta_{пл} > \Delta_{ЭКВ}$ ) формула Альтшуля А.Д. приводится к формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (5.7)$$

Для гидравлических шероховатых труб ( $\delta_{пл} < \Delta_{ЭКВ}$ ) указанная формула приводится к формуле Шифринсона Б.П. :

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta_{ЭКВ}}{d} \right)^{0,25} \quad (5.8)$$

где  $\delta_{пл}$  - толщина ламинарной пленки, определяемая по формуле:

$$\delta_{пл} := \frac{68,4 \cdot \frac{d}{2}}{Re^{0,875}} \quad (5.9)$$

### Описание экспериментальной установки.

Схема установки приведена на рис. 5.2. и включает напорный резервуар 1, оборудованный сливом 6 для стабилизации напора; к резервуару 1 присоединен стальной трубопровод 2 постоянного диаметра, снабженный в начале и в конце вентилями 3, 4 и пьезометрами 5.

Для измерения расхода воды трубопровода 2 установка снабжена мерным баком 7, снабженным пьезометром 8 и клапаном 9. Питание

установки осуществляется насосом 12 по нагнетательному трубопроводу 13, снабженному вентилем 14. Установка работает в замкнутом цикле. Вода насосом 12 качается из резервуара 11 и, проходя по установке, попадает в мерную емкость 7, откуда по трубе 10 поступает вновь в резервуар 11.

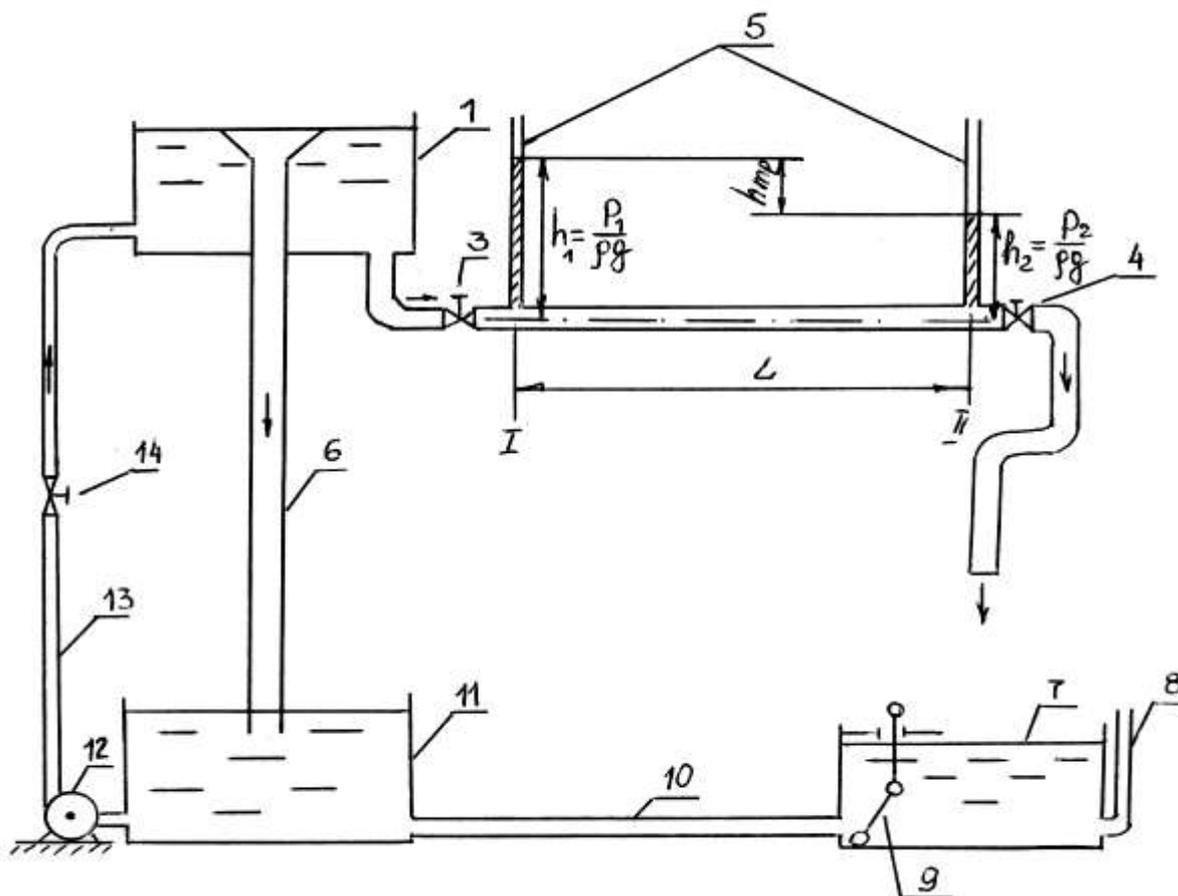


Рис. 5.2. Схема экспериментальной установки:

1 – напорный резервуар; 2 – испытуемый трубопровод; 3, 4, 14 – вентили; 5, 8 - пьезометры; 6 - слив; 7 - мерный бак; 9 – клапан; 10 – перепускной трубопровод; 11 – сливная емкость; 12 – насос; 13 – питающий трубопровод.

### **Порядок выполнения работы.**

1. Открыв полностью задвижки 3, 4 задвижкой 14, регулируют уровень в баке 1 (добиваются стабилизации уровня). При этом по трубе 2 будет идти максимальный расход и, соответственно, в трубопроводе будет максимальная скорость.
2. После того, как воздух из установки будет вытеснен и уровни в пьезометрах 5 стабилизируются, снимают показания пьезометров  $h_1 = P_1 / \rho g$  и  $h_2 = P_2 / \rho g$ , замеряют температуру воды  $t$  и объемным способом замеряют расход воды.

3. Уменьшают расход воды в трубопроводе 2 вентилем 4 примерно на 10% и после стабилизации уровней в пьезометрах снимают показания их и расход Q.

Таким образом, провести 4...5 опытов, изменяя каждый расход, примерно на 10 - 15% от максимального.

Все данные опытов заносятся в журнал лабораторных работ.

### **Обработка результатов измерений и их анализ.**

1. По уравнению неразрывности определяют среднюю скорость потока в трубопроводе:  $g = 4Q/\pi d^2$

2. По показаниям пьезометров находят потери напора:  $h_{мп.} = h_l = h_1 - h_2$

3. Определяют кинематический коэффициент вязкости по формуле:

$$v = \frac{0.00179}{1 + 0.037t + 0.00022t^2}$$

4. Определяют число Рейнольдса  $Re = \frac{g \cdot d}{v}$  и определяют режим движения;

5. По формуле Дарси-Вейсбаха (5.4) определяют опытное значение коэффициента  $\lambda_{оп}$ ;

6. Находят предельные числа Рейнольдса в условиях турбулентного движения:

а) для области гидравлически гладких труб  $Re_{пр1} \approx 20 \frac{d}{\Delta_{ЭКВ}}$ ;

б) для квадратичной области сопротивления  $Re_{пр2} \approx 500 \frac{d}{\Delta_{ЭКВ}}$

и сравнивая с числом  $Re$  по опытным данным определяют область гидравлического сопротивления;

7. По эмпирическим формулам (5.6...5.8), выбирая область сопротивления для конкретного опыта, вычисляют теоретическое значение  $\lambda_T$ ;

8. Определяют расхождение между опытными и теоретическими значениями коэффициента  $\lambda$  по формуле.

$$\Delta\lambda\% := \frac{\lambda_T - \lambda_{оп}}{\lambda_T} \cdot 100\%$$

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. Определение коэффициентов местных сопротивлений

### Цель работы:

1. Определение экспериментальным путем коэффициентов местных гидравлических сопротивлений.
2. Построение диаграммы Бернулли для трубопровода с местными сопротивлениями.
3. Сравнение полученных экспериментальным путем значений  $\xi$  с вычисленными по формулам.

### Краткие теоретические сведения.

Местные потери напора (энергии) можно определить из уравнения Бернулли, записанного для двух конкретных сечений (перед и за сопротивлением),

$$h_M = \left( Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left( Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) \quad (6.1)$$

где  $h_M$  - местные потери напора (энергии) или  $h_M = E_1 - E_2$ ;  
 $E_1$ ;  $E_2$  - удельная энергия потока в первом и втором сечениях ( до и после сопротивления).

Местные потери напора ( энергии) определяются также по формуле (6.2):

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

где  $\xi$  - коэффициент местного сопротивления.

Формула (6.2) применима при равенстве диаметров трубопровода до и за местным сопротивлением, когда  $v_1 = v_2 = v$ .

Когда  $v_1 \neq v_2$  случай внезапного расширения (сужения) или плавного расширения (сужения), местные потери напора (энергии) определяются по формулам:

$$\xi_{в.р.} = \left( \frac{S_2}{S_1} - 1 \right)^2; \quad \xi_{в.с.} = 0,5 \cdot \left( 1 - \frac{S_2}{S_1} \right) \quad (6.3)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  - площади сечений трубопровода соответственно до и после расширения (сужения).

Опытное значение коэффициента местного сопротивления определяется из формулы (6.2).

### Описание экспериментальной установки.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 6.1. и включает напорный бак 1, к которому присоединен трубопровод с местными сопротивлениями - внезапным расширением 2 и внезапным сужением 3. Трубопровод с местными сопротивлениями оснащен пьезометрами 4. Трубопровод с сопротивлениями на входе и выходе снабжен вентилями 5, 6.

Экспериментальная установка снабжена водомерным устройством в виде водомерного бака 7 с пьезометром 8 и сбросным клапаном 9. Подача воды осуществляется насосом 12. Регулирование подачи в напорный бак осуществляется вентилем 13 на напорном трубопроводе 14. Насос питается из резервуара 10, соединенного трубопроводом с мерной емкостью 7. Таким образом, экспериментальная установка работает в замкнутом цикле.

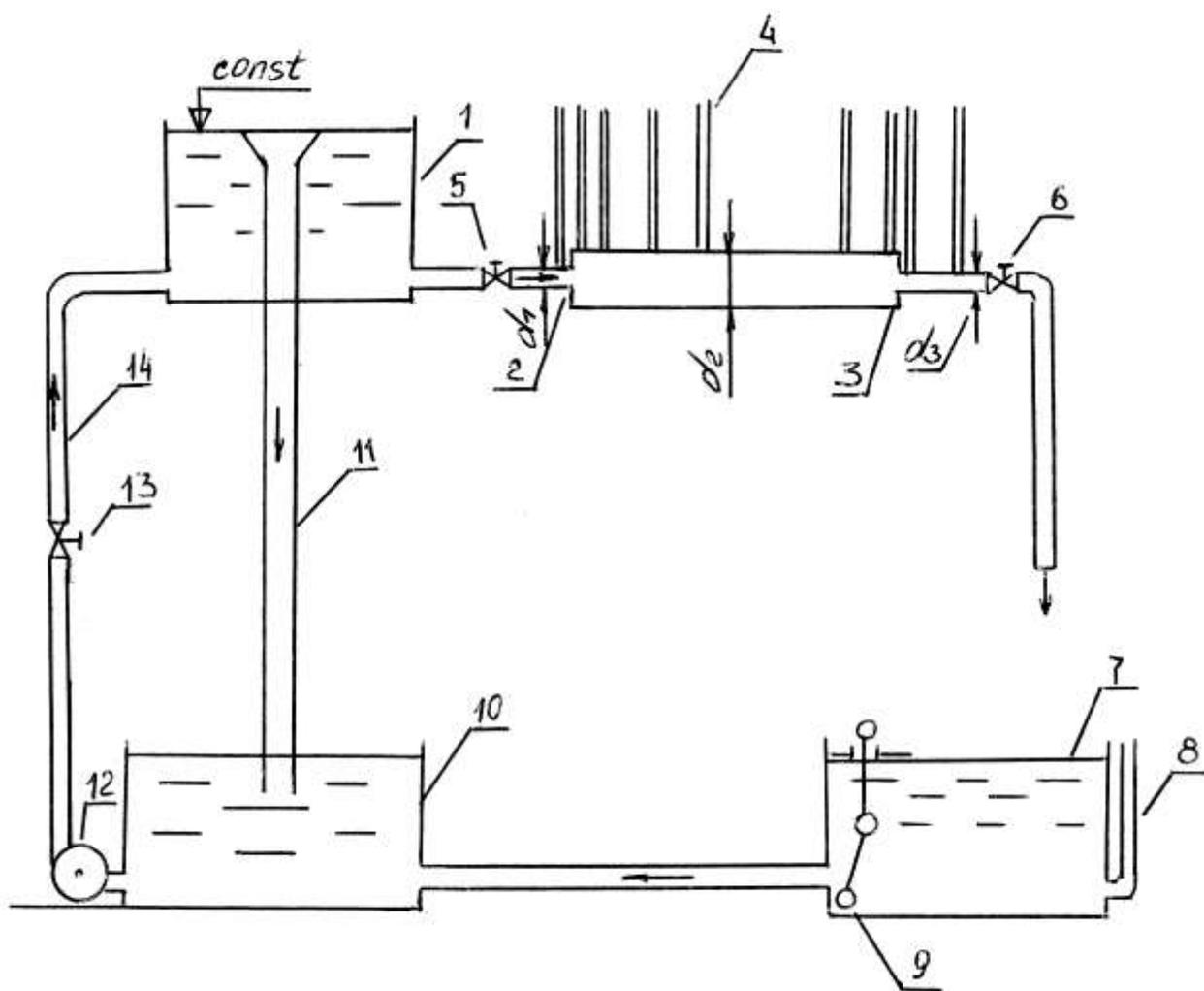


Рис. 6.1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – напорный бак; 2 – внезапное расширение; 3 – внезапное сужение;  
 4, 8 – пьезометры; 5, 6, 13 – вентили; 7 – мерный бак; 9 – клапан;  
 10 – резервуар; 11 – слив; 12 – насос; 14 – питающий трубопровод.

#### **Порядок выполнения работы.**

1. Открывают полностью вентили 5 и 6 и клапан 9, запускают насос 12. Вентилем 13 регулируют подачу, добиваясь, чтобы в напорном баке 1 стабилизировался уровень (наблюдался тонкий слой перелива в слив 11).

2. После стабилизации уровня в напорном баке 1 и пьезометрах 4 закрывают клапан 9 и объемным способом измеряют расход воды в трубопроводе с сопротивлениями. Затем снимают показания пьезометров.

3. Прикрывая вентиль 6, уменьшают расход в трубопроводе с сопротивлениями примерно на 10% от максимального, повторяют в той же последовательности опыт. Таким образом, проводят 3 - 5 опытов, изменяя каждый раз расход примерно на 10% от максимального.

Результаты измерений заносятся в журнал лабораторных работ.

### **Обработка опытных данных.**

1. По измеренным значениям определяют расходы и средние скорости в трубопроводе. При этом вычисляют скорость  $g$  до и после сопротивления, по которым определяют скоростные напоры  $\frac{\alpha g^2}{2g}$ , приняв при этом для всех

сечений  $\alpha=1$ ;

2. Вычисляют площади живых сечений  $S_i = \pi d^2/4$

3. Определяют потери напора как разность удельных энергий в сечениях до и после сопротивления по формуле (6.1);

4. Определяют опытные значения коэффициентов местных сопротивлений из формулы (6.2);

5. Определяют теоретические значения коэффициентов местных сопротивлений (внезапного расширения и внезапного сужения) по формуле (6.3);

6. Определяют сходимость полученных значений коэффициентов местных сопротивлений

полученных по опытным данным и вычисленным по формуле (6.3)

7. Строят график напорных линий.

## Список литературы

1. Кудинов, Василий Александрович.

ГИДРАВЛИКА : Учебник и практикум / Кудинов В.А. - Отв. ред. - 4-е изд. ; пер. и доп. - М. : Издательство Юрайт, 2015. - 386. - (Бакалавр. Академический курс).Режим доступа <http://www.biblio-online.ru/>. - [ЭБС «Юрайт»].

2.Замалаев З.Х. Основы гидравлики и теплотехники (учебное пособие для студ.ВПО, обучающихся по программе Бакалавр – СПб.: Лань, 2014-352с.

/

3.Угинчус, Александр Антонович.

Гидравлика и гидравлические машины [Текст] : учебник для студентов машиностроительных вузов. - 5-е изд. ; стереотип. - М. : Аз-бук, 2009. - 396 с.

4Бабаев, М. А.

Гидравлика : Учебное пособие / Бабаев М. А. - Саратов : Научная книга, 2012. - 191 с. IPR Медиа

5. Гидравлика и гидропневмопривод [Текст] : учебник для студентов вузов / под ред. С. П. Стесина. - 5-е изд., перераб. - М. : Академия, 2014. - 352 с