

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ

ФГБОУ ВПО «БРЯНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Кафедра «Природообустройства и водопользования»

Е.В. Байдакова., Е.М. Байдаков

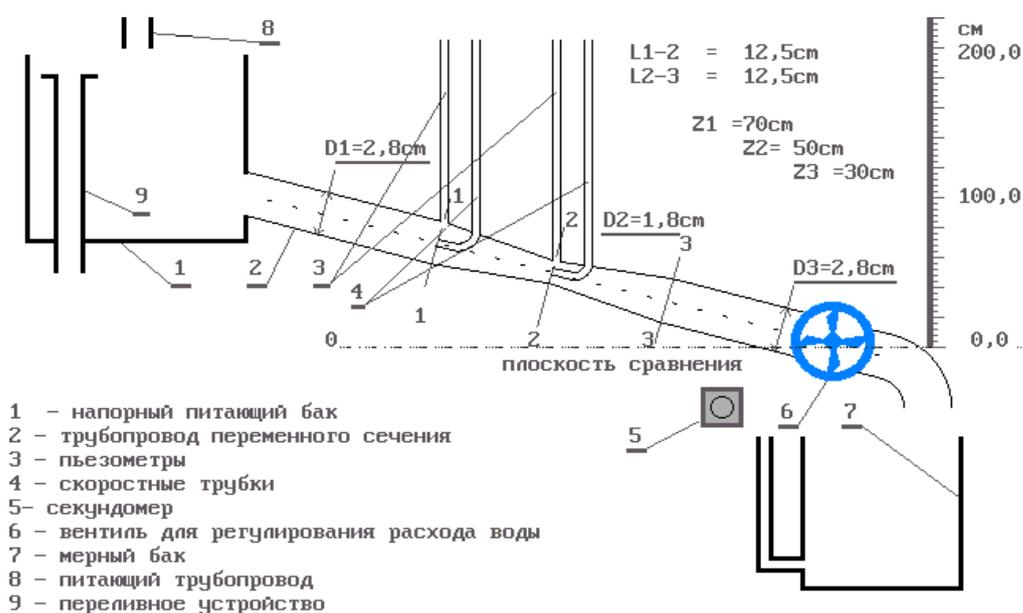
## Гидравлика

### Методические указания

к выполнению лабораторных работ

для студентов очной и заочной форм обучения по направлению:

природообустройство и водопользование, землеустройство и кадастры



Брянск 2013г

УДК 621.22(07)  
ББК 30.123  
Г 46

Байдакова, Е.В. Гидравлика: Методические указания к выполнению лабораторных работ/ Е.В. Байдакова, Е.М. Байдаков. – Издательство Брянской ГСХА, 2013 г. - 51 с.

Составители: **Е.В. Байдакова**, кандидат технических наук, доцент кафедры природопользования и водопользования;

**Е.М. Байдаков**, кандидат технических наук ст. преподаватель кафедры технологического оборудования животноводства и перерабатывающих производств.

Утверждено научно-методическим советом БГСХА протокол № 18 от «11» января 2013 г.

Даны методические рекомендации для выполнения лабораторных работ по курсу «Гидравлика». Для студентов очной и заочной форм обучения.

Рецензенты: к.т.н., доцент Мельникова Е.А.  
к.т.н., доцент Широбокова О.Е.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом БГСХА.  
Протокол № 18 от «11» января 2013 г.

© Байдакова Е.В., 2013

© Байдаков Е.М., 2013

© Брянская ГСХА., 2013

## Содержание

<b>Работа 1.</b> Измерение гидростатического давления и экспериментальное подтверждение закона Паскаля.....	4
<b>Работа 2.</b> Определение опытным путем слагаемых уравнения Д. Бернулли при установившемся неравномерном движении жидкости в напорном трубопроводе.....	11
<b>Работа 3.</b> Экспериментальная иллюстрация ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости, определение законов сопротивления и критического числа Рейнольдса .....	19
<b>Работа 4.</b> Изучение гидравлических сопротивлений напорного трубопровода с определением коэффициентов гидравлического трения по длине и местных сопротивлений .....	28
<b>Работа 5.</b> Изучение истечения жидкости через малые отверстия в тонкой стенке и насадки при постоянном напоре в атмосферу .....	36
<b>Работа 6.</b> Экспериментальное изучение прямого гидравлического удара в напорном трубопроводе .....	43
Список литературы .....	48

## **Работа 1. ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЗАКОНА ПАСКАЛЯ**

**Вводная часть.** Гидростатическим давлением  $p$  называют нормальное сжимающее напряжение, возникающее в покоящейся жидкости под действием поверхностных и массовых сил.

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S}, \quad (1)$$

где  $\Delta P$ - элементарная равнодействующая поверхностных и массовых сил (гидростатическая сила), Н;

$\Delta S$  - элементарная площадка действия,  $m^2$ .

Из формулы (1) видно, что гидростатическое давление  $p$  есть предел отношения элементарной гидростатической силы  $\Delta P$  к элементарной площади действия  $\Delta S$ , когда последняя стремится к нулю.

За единицу гидростатического давления принято равномерно распределённое давление, создаваемое силой в 1 Н, на площади в  $1m^2$ , т.е.  $p = 1Н/1m^2 = 1Па$  (один Паскаль).

Гидростатическое давление, отсчитываемое от нуля, называют абсолютным ( $P_{абс}$ ), а отсчитываемое от атмосферного ( $P_{ат}$ ) – избыточным ( $P_{изб}$ ), следовательно

$$P_{абс} = P_{ат} + P_{изб}, \quad (2)$$

Очевидно,

$$P_{изб} = P_{абс} - P_{ат} \quad (3)$$

В гидравлических расчётах величину нормального атмосферного давления считают равной  $P_{ат} = 98100$  Па.

Из формулы (3) видно, что в зависимости от соотношения между  $P_{абс}$  и  $P_{ат}$  избыточное давление  $P_{изб}$  может быть и положительной, и отрицательной величиной. Положительное избыточное давление называют манометрическим.

метрическим, а отрицательное – вакуумметрическим. Приборы, применяемые для измерения  $+P_{изб}$  и  $-P_{изб}$ , называют соответственно манометрами и вакуумметрами.

По принципу действия манометры и вакуумметры делятся на две группы: жидкостные и механические.

Жидкостный манометр (пьезометр) представляет собой стеклянную трубку, верхний конец которой открыт в атмосферу, а нижний присоединён к точке, где измеряется манометрическое давление.

Манометрическое давление, выраженное через показания манометра, равно:

$$P_{изб} = \rho g h_{P_{изб}}, \quad (4)$$

где  $\rho g = \gamma$  - объемный вес жидкости;

$h_{P_{изб}}$  - пьезометрическая высота, т.е. высота, отсчитываемая от точки подключения пьезометра до уровня жидкости в нём.

Действие механических приборов основано на деформации под действием давления упругого элемента (пружинны или мембраны). Заметим, что пружинный манометр показывает давление в точки жидкости на уровне оси вращения его стрелки. Если высотное положение оси вращения стрелки и точки подключения манометра не совпадает (рис 1), в показание манометра ( $P_m$ ) вводят поправку ( $\pm \rho g y$ ).

Для случая, изображённого на рис.1,

$$P_{изб} = P_m + \rho g y \quad (5)$$

где  $y$  - превышение оси вращения стрелки манометра над точкой его подключения, М.

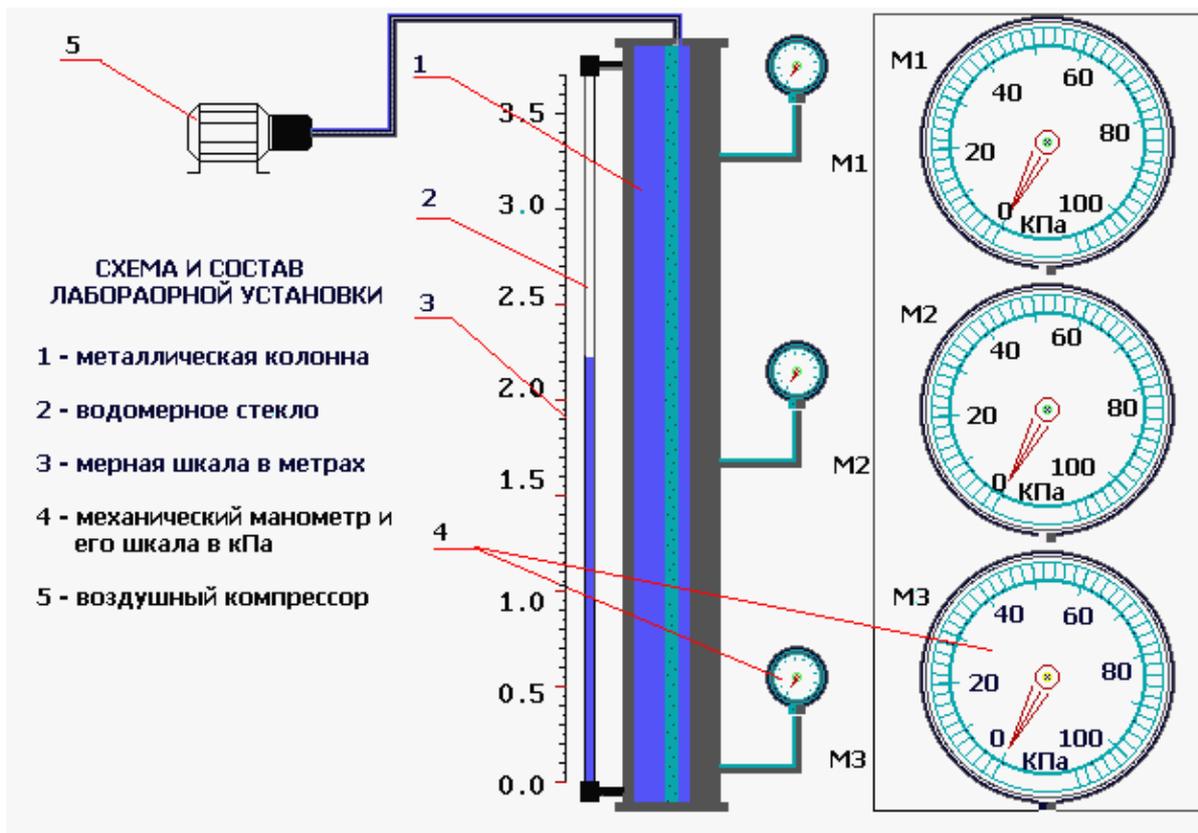


Рис. 1. Схема установки для экспериментального подтверждения закона Паскаля

В данной лабораторной работе предусмотрено измерение манометрического давления пружинными манометрами.

Когда на покоящуюся жидкость действует только сила тяжести, распределение гидростатического давления  $p$  по глубине  $h$  (рис. 2) описывается основным уравнением гидростатики:

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (6)$$

где  $p$  - гидростатическое давление в жидкости на глубине  $h$ , Па;

$p_0$  - внешнее давление, т.е. гидростатическое давление на свободной поверхности жидкости, Па;

$h$  - глубина погружения в жидкость рассматриваемой точки, М;

$\rho gh$  - весовое давление, т.е. гидростатическое давление, создаваемое весом столба  $h$  жидкости, Па.

Из уравнения (6) видно, что при  $p_0 = const$  и  $\rho g = const$  давление  $p$  с изменением величины  $h$  изменяется по линейному закону (см. рис. 2). Вычислив по уравнению давление  $p$  в двух точках, заглублённых на разную величину  $h$ , можно построить диаграмму распределения гидростатического давления по глубине, называемую эпюрой гидростатического давления (см. рис. 2).

Из уравнения (6) следует, что внешнее давление  $p_0$  в покоящейся жидкости передаётся во все точки её объёма без изменения (см. рис. 2). Это следствие, вытекающее из уравнения (6), называют законом Паскаля. Справедливость этого закона предстоит проверить опытным путём в данной работе.

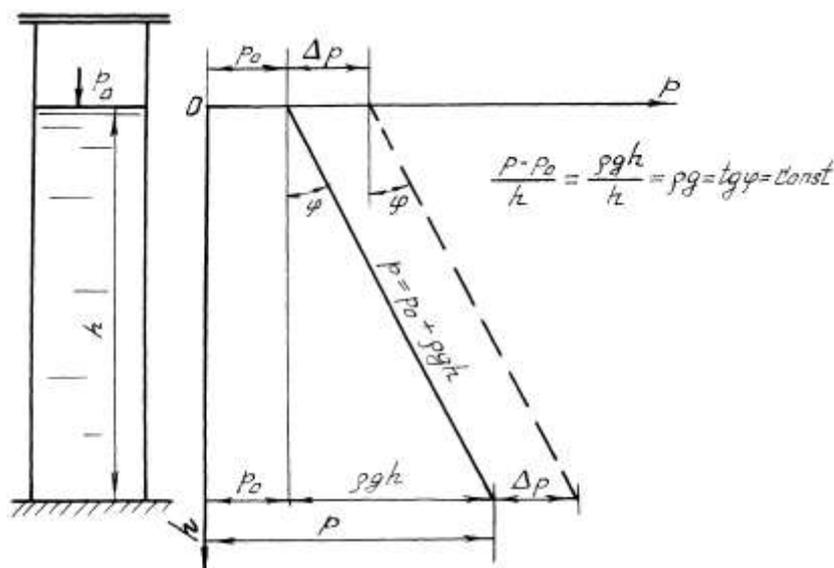


Рис. 2. К закону Паскаля и его экспериментальному подтверждению

- Цель работы:**
1. Измерить с помощью пружинных манометров гидростатическое давление в трёх точках (А, В, С), заглублённых на различную величину под уровень жидкости, находящейся в абсолютном покое под действием силы тяжести;
  2. Подтвердить на основании опытных данных закон Паскаля;
  3. Построить по данным опыта №2 в масштабе эпюру манометрического давления по глубине  $h$ .

**Описание установки.** Установка (см. рис. 1) представляет собой толстостенный стальной цилиндр 1, частично заполненный водой, уровень которой измеряется водомерной трубкой 5 со шкалой 4.

Для изменения гидростатического давления над свободной поверхностью жидкости (в т. А) и в точках В и С, заглублённых под уровень соответственно на  $h_B$  и  $h_C$ , подключены пружинные манометры  $M_A$ ,  $M_B$ ,  $M_C$ .

В пространство над свободной поверхностью можно подавать сжатый воздух от компрессора (на рис. не показан) по трубопроводу 3 открытием вентиля 7. Для сброса избыточного гидростатического давления в цилиндре служит вентиль 6. В крышке цилиндра имеется предохранительный клапан 2, отрегулированный на давление 500 кПа.

### **Порядок выполнения работы и обработка опытных данных**

Необходимо выполнить два опыта, обеспечив в первом  $p_{0_{abc}} = p_{atm} \Rightarrow p_{0_{изб}} = 0$ , а во втором -  $p_{0_{abc}} > p_{atm} \Rightarrow p_{0_{изб}} > 0$ .

**Опыт №1.** Открыть вентиль 6, для обеспечения  $p_{0_{изб}} = 0$ , далее, измерить с помощью водомерной трубки 5 и шкалы 4 глубины погружения  $h_B$  и  $h_C$  точек В и С, а также превышения  $u_B$  и  $u_C$  осей вращения стрелок манометров  $M_B$  и  $M_C$  над точками их подключения. Затем измерить показания всех трёх манометров ( $M_A$ ,  $M_B$ ,  $M_C$ ). Полученные данные записать в таблицу 1 (графы 4 и 6).

**Опыт №2.** Закрывать вентиль 6, а вентиль 7, открыть. Затем включить компрессор и для подачи сжатого воздуха в цилиндр 1. Довести  $p_{0_{изб}}$  до величины, указанной преподавателем, после чего компрессор отключить. Далее, из-

мерить одновременно показания манометров  $M_A, M_B, M_C$ . Результаты измерений записать в графу 5 таблицы 1. Открыть вентиль 6 для сброса давления сжатого воздуха.

Выполнить все вычисления, предусмотренные таблицей 1. Дать заключение по результатам работы.

Таблица 1

№ по зи ц и й	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Един. измерен.	Результаты измерений и вычисл.		Примечания
			Опыт № 1	Опыт № 2	
1	Показания манометров $M_A, M_B, M_C$	$p_{M_A} \approx p_0$	Па		
		$p_{M_B}$	Па		
		$p_{M_C}$	Па		
2	Избыточное гидростатическое давление в точках А, В, С	$p_A \approx p_{M_A} \approx p_0$	Па		
		$p_B = p_0 + \rho g y_B$	Па		
		$p_C = p_0 + \rho g y_C$	Па		
3	Приращение избыточного гидростатического давления	$\Delta p_A \approx \Delta p_0 = p_{0_2} - p_{0_1}$	Па		$h_A = \dots \text{м}$
		$\Delta p_B = p_{B_2} - p_{B_1}$	Па		$h_C = \dots \text{м}$
		$\Delta p_C = p_{C_2} - p_{C_1}$	Па		$y_B = \dots \text{м}$ $y_C = \dots \text{м}$
4	Средняя величина приращения избыточного гидростатического давления	$\Delta p_{cp} = \frac{\Delta p_0 + \Delta p_B + \Delta p_C}{3}$	Па		$\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
5	Относительные отклонения приращений давления в точках А, В, С от средней его величины.	$E_{\Delta p_0} = (\Delta p_{cp} - \Delta p_0) / \Delta p_{cp}$	-		
		$E_{\Delta p_B} = (\Delta p_{cp} - \Delta p_B) / \Delta p_{cp}$	-		
		$E_{\Delta p_C} = (\Delta p_{cp} - \Delta p_C) / \Delta p_{cp}$	-		

**Примечание к таблице 1.**

Индексы «1» и «2» у величин гидростатического давления (см. позицию 3 таблицы) обозначают номер опыта.

## Основные контрольные вопросы

1. Что такое гидростатическое давление и каковы его свойства?
2. Поясните, что такое абсолютное и избыточное гидростатическое давление и какова связь между ними?
3. Объясните, что понимают под терминами: «внешнее давление» и «весовое давление»?
4. Напишите и поясните основное уравнение гидростатики.
5. Сформулируйте закон Паскаля.
6. Назовите приборы для измерения избыточного гидростатического давления и поясните принцип их действия.
7. Поясните, что такое пьезометрическая высота?
8. В чём состояло принципиальное отличие в условиях проведения первого и второго опытов?
9. Для чего нужно знать превышение оси вращения стрелки пружинного манометра над точкой его подключения?

Учебная литература к работе 1.

1. (с.32....45); 2. (с.25....26); 3. (с.34....38); 4. (с.23....34); 5. (с.27....38);

**Работа 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПЫТНЫМ ПУТЕМ СЛАГАЕМЫХ  
УРАВНЕНИЯ Д. БЕРНУЛЛИ ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ  
НЕРАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ  
В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ**

**Вводная часть.** Для двух произвольно выбранных живых сечений I-I и II-II струйки реальной жидкости (рис.3) при установившемся движении уравнение Д. Бернулли имеет вид:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + h_{w1-2} \quad (1)$$

Слагаемые, входящие в уравнение (1), можно истолковать с геометрической и энергетической точек зрения.

С геометрической точки зрения, слагаемые уравнения (1) являются высотами (напорами):  $Z$  - геометрическая высота (напор), т.е. превышение центра тяжести рассматриваемого поперечного сечения струйки над плоскостью сравнения 0-0, выбираемой произвольно (см. рис.3);  $p/\rho g$  пьезометрическая высота, т.е. высота подъема жидкости в пьезометре, подключенном к центру тяжести рассматриваемого сечения струйки, отвечающая гидродинамическому давлению  $p$  в этой точке;  $U^2/2g$  - скоростная высота (напор), отвечающая местной скорости  $U$ , т.е. скорости в центре тяжести сечения;

$$Z + \frac{p}{\rho g} - \text{гидростатический напор;}$$

$$Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} = H - \text{полный напор в рассматриваемом сечении струйки;}$$

$h_{w1-2} = H_1 - H_2$  - потеря полного напора, т.е. часть полного напора, затраченная на преодоление гидравлических сопротивлений на пути между сечениями I-I и II-II.

С энергетической точки зрения слагаемые уравнения (1) представляют собой разновидности удельной энергии а именно:

$Z$  - удельная потенциальная энергия положения жидкости в рассматриваемом сечении струйки;

$P/\rho g$  - удельная потенциальная, энергия. давления;

$U^2/2g$  - удельная кинетическая энергия;

$Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g}$  - полная удельная энергия;

$Z + \frac{p}{\rho g}$  - удельная потенциальная энергия;

$h'_{w1-2}$  - потеря полной удельной энергии струйки, т.е. часть ее, затраченная на преодоление работы сил внутреннего трения, обусловленного вязкостью жидкости.

Удельной энергией называется энергия, приходящаяся на единицу веса жидкости.

Величины слагаемых уравнения (1) могут быть определены опытным путем следующим образом:

$z$  - геометрическим нивелированием, или же измерением линейкой

$p/\rho g$  - с помощью пьезометрической трубки (пьезометра);

$U^2/2g$  - по разности отметок уровней жидкости в скоростной и пьезометрической трубках, подключенных к рассматриваемой точке живого сечения струйки (рис. 3)

$h'_{w1-2}$  - по разности отметок уровней воды в скоростных трубках, подключенных к сечениям I-I и II-II (см. рис. 4).

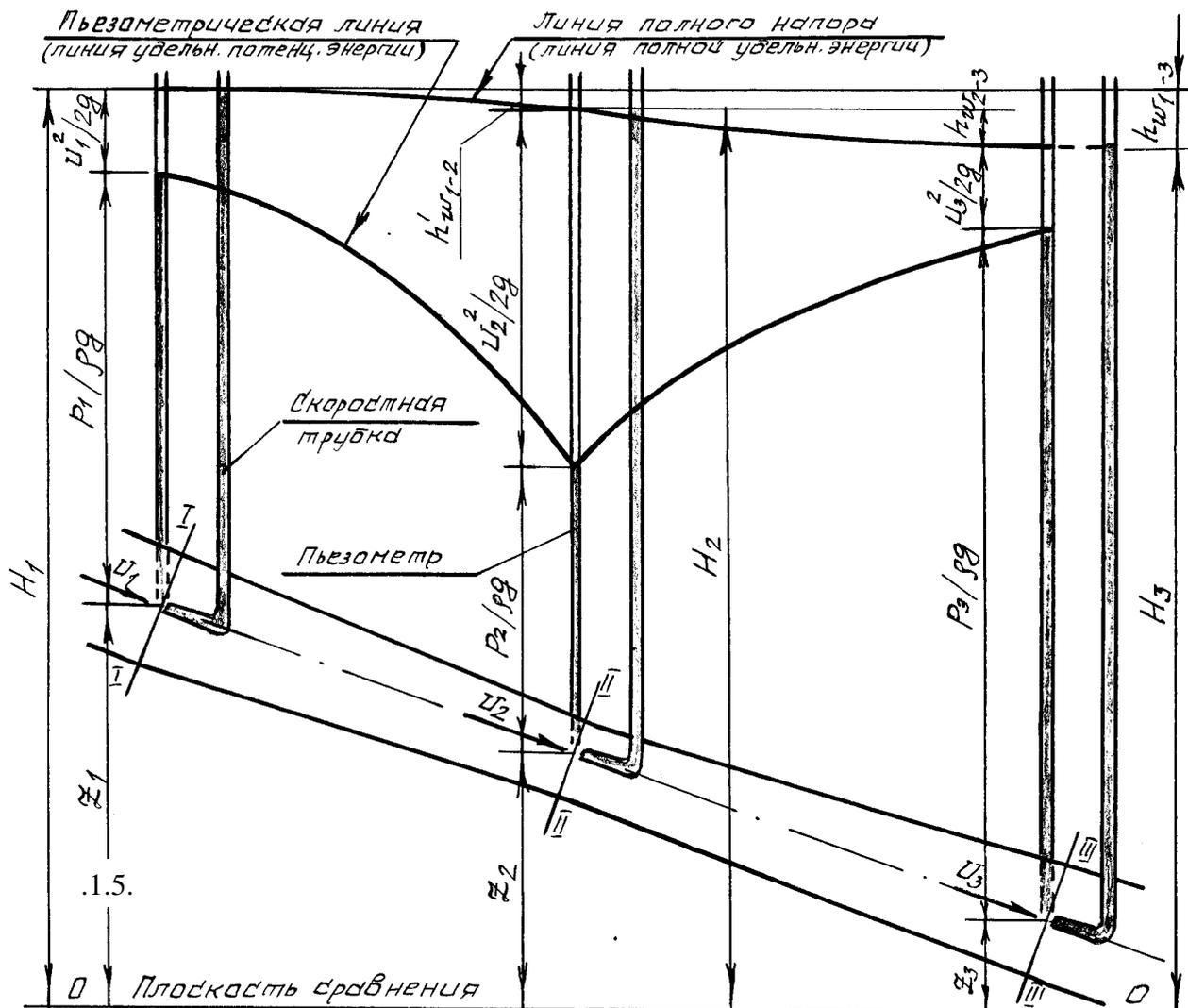
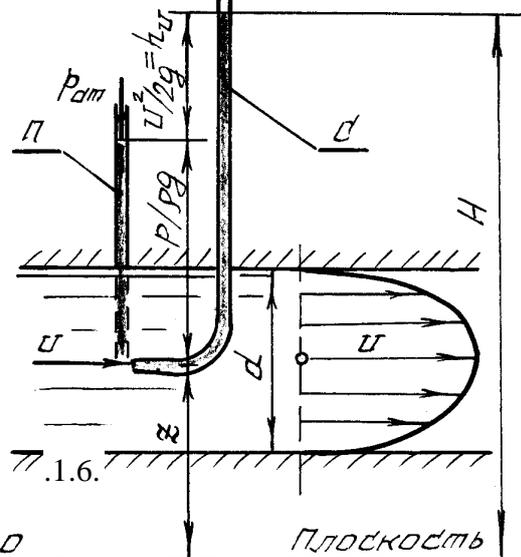


Рис. 3. Диаграмма уравнения Д.Бернулли для струйки реальной жидкости

а) напорное движение



б) безнапорное движение жидкости

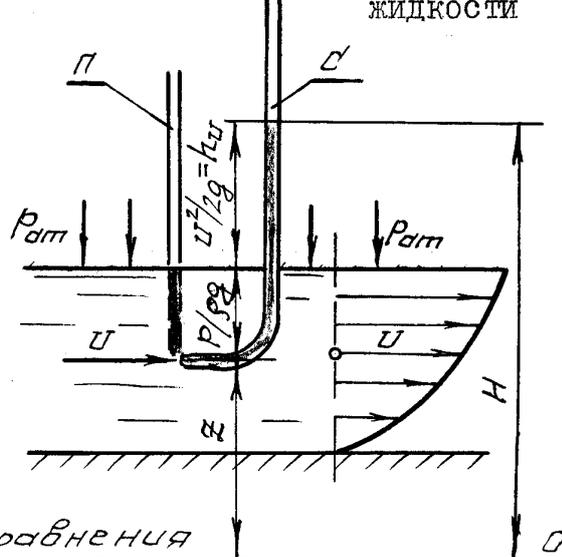


Рис. 4. К измерению скоростного напора  $u^2/2g$

Скоростная трубка (см. рис. 4) представляет собой трубку, верхний конец которой открыт в атмосферу, а нижний изогнут навстречу скорости и в рассматриваемой точке потока жидкости. Благодаря этому у входа в изогнутый конец скоростной трубки кинетическая энергия частицы жидкости преобразуется в потенциальную энергию давления столба жидкости высотой  $h_u = U^2/2g$ .

Поскольку срез нижнего конца скоростной трубки перпендикулярен вектору скорости, а срез нижнего конца пьезометра параллелен (см. рис. 4), уровень жидкости в скоростной трубке всегда устанавливается выше, чем в пьезометре, на величину  $U^2/2g$ .

Прибор, объединяющий конструктивно пьезометрическую (П) и скоростную (С) трубки, называется трубкой Пито и широко применяется для измерения скорости движения жидкости  $U = \sqrt{2gh_u}$ .

Для двух сечений потока реальной жидкости уравнение Д. Бернулли имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} + h_{w1-2}, \quad (2)$$

где  $\frac{\alpha U^2}{2g}$  скоростной напор, отвечающий средней скорости  $U = \frac{Q}{\omega}$  потока жидкости в рассматриваемом живом сечении (здесь  $Q$ , - расход потока жидкости,  $\omega$  - площадь живого сечения потока);

$h_{w1-2}$  - потеря полного напора (полной удельной энергии) на преодоление работы сил внутреннего и внешнего трения на пути между живыми сечениями потока жидкости I-I и II-II;

$\alpha$  - коэффициент Кориолиса (корректив кинетической энергии), учитывающий неравномерность распределения местных скоростей  $U$  по живому сечению потока, обусловленную вязкостью жидкости.

Величина  $\alpha$  зависит от режима течения жидкости, а также от вида движения. Так, при равномерном движении для ламинарного режима  $\alpha=2,0$ , а для турбулентного -  $\alpha=1,05 \dots 1,15$ .

Слагаемые уравнений (1) и (2) в различных живых сечениях можно изображать графически в виде диаграммы уравнения Д. Бернулли (графика напоров), см. рис.3, дающей наглядное представление о перераспределении по пути движения жидкости потенциальной и кинетической энергии, а также о характере убывания полной энергии.

**Цель работы:** 1. Определить опытным путем слагаемые  $z$ ,  $p/\rho g$ ,  $U^2/2g$  уравнения Д. Бернулли для сечений I-I...II-II, а также потери полного напора  $h_{w1-2}$  между сечениями (см. рис. 3).

2. Вычислить средние скорости потока и отвечающие им скоростные напоры  $U^2/2g$  для указанных живых сечений потока жидкости.

3. Построить в масштабе по опытным данным пьезометрическую линию и линию полного напора (см. рис. 3).

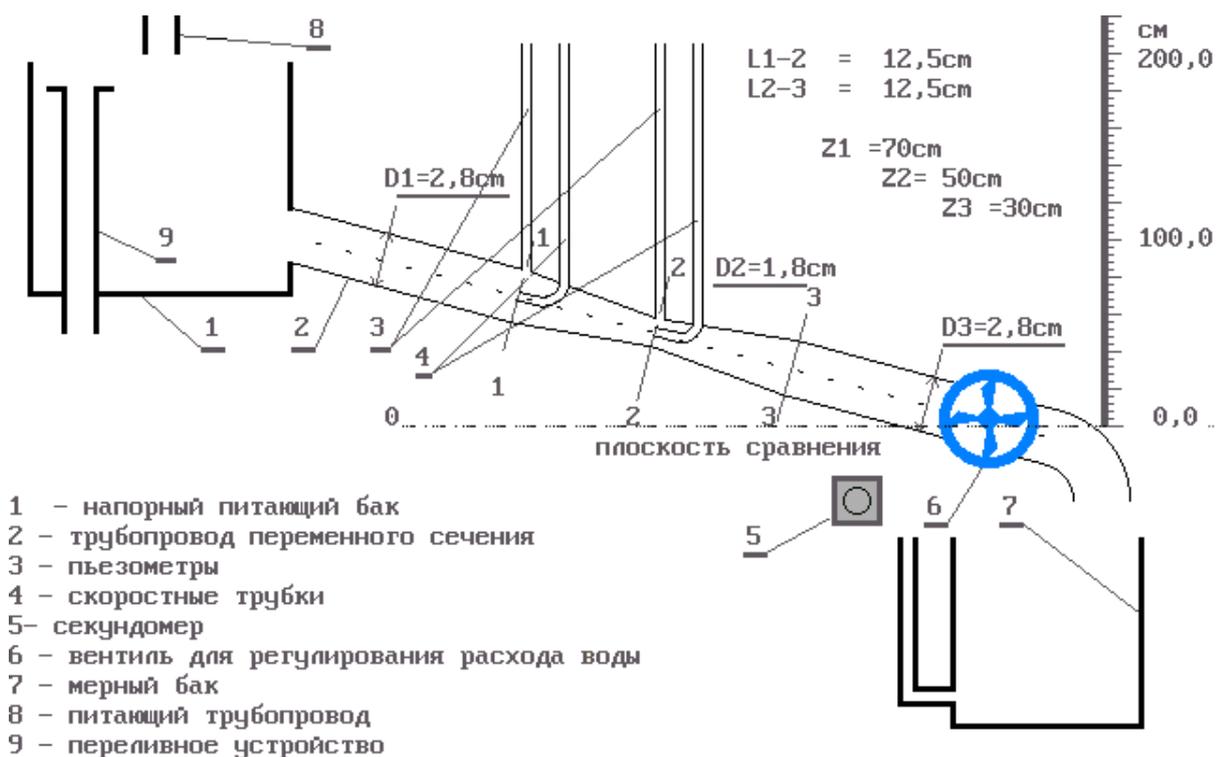


Рис. 5. Схема установки

**Описание установки.** Установка (рис. 5) представляют собой трубопровод 2 переменного сечения с напорным баком 1, вода в который подается по питающему трубопроводу 8 открытием вентиля 9. Бак 1 снабжен переливным устройством 10 для поддержания уровня воды на постоянной отметке, чтобы обеспечить в трубопроводе 2 установившееся движение жидкости. К сечениям I-I...II-II трубопро-

вода 2 подключены пьезометры 3 и скоростные трубки 4 для измерения величин  $p/\rho g$  и  $U^2/2g$ . Величина расхода воды в трубопроводе 2 регулируется вентилем 5. Для измерения расхода воды имеются мерный бак 6 и секундомер 7.

### **Порядок выполнения работы и обработка опытных данных**

1. При закрытом вентиле 5 открыть вентиль 9 для заполнения бака 1 и трубопровода 2 водой. При этом следует обратить внимание на уровни воды в пьезометрических 3 и скоростных трубках 4. Эти уровни при отсутствии воздуха в системе должны быть на одной отметке.
2. Открыть вентиль 5 так, чтобы трубопровод 2 работал полным сечением, а уровень воды в баке постоянным.
3. Измерить с помощью бака 6 и секундомера 7 расход воды. Затем линейкой измерить геометрические высоты  $z$  центров тяжести сечений I-I...II-II относительно плоскости сравнения 0-0, отмеченной на установке.
4. Далее, определить по шкалам отметки уровней воды в пьезометрах и скоростных трубках в сечениях I-I...II-II. Результаты всех измерений записать в таблицу 2. Затем выполнить все вычисления, предусмотренные табл. 2, и построить в масштабе по полученным данным линии полного напора и пьезометрическую, так, как показано на рис. 3.
5. Дать заключение по результатам работы.

### **Основные контрольные вопросы**

1. Поясните энергетический смысл слагаемых уравнения Д. Бернулли.
2. Как называется коэффициент  $\alpha$ , входящий в уравнение Д. Бернулли для потока реальной жидкости, что он учитывает и от чего зависит его величина?
3. Объясните, что обусловлены потери полного напора и каков их энергетический смысл?
4. Поясните, что понимают под термином "удельная энергия"?
5. Объясните термины "местная скорость" и "средняя скорость" и укажите, как определяют эти скорости?
7. Поясните, что такое скоростная трубка и трубка Пито?

8. Поясните, что такое линия полного напора и пьезометрическая линия, что будут представлять собой эти линии при равномерном движении реальной жидкости?

9. Что понимают под термином «живое сечение потока жидкости»?

Таблица 2

№ поз.	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. из м.	Результаты измерений и вычислений		
			I-I	II-II	III-III
1	2	3	4	5	6
1	Геометрические высоты центров тяжести сечений $z$	м			
2	Отметки уровней воды в пьезометрах, т.е. гидростатические напоры $(z+p/\rho g)$	м			
3	Отметки уровней воды в скоростных трубках, т.е. полные напоры $H=z + P/\rho g + U^2/2g$	м			
4	Пьезометрические высоты $(z + P/\rho g) - z$	м			
5	Скоростные высоты $U^2/2g = H - (z + P/\rho g)$	м			
6	Потери полного напора на пути между соседними живыми сечениями струйками $h'_{wi-(i+1)} = H_i - H_{i+1}$	м			
7	Суммарные потери полного напора $h'_{wI-III} = H_I - H_{III}$	м			
8	Объем воды в мерном баке $W$	м <sup>3</sup>			
9	Продолжительность наполнения объема $W$ в мерном баке $t$	с			
10	Расход воды в трубопроводе $Q = W/t$	м <sup>3</sup> /с			
11	Средняя скорость движения воды в $V = Q/\omega$	м/с			
12	Скоростная высота, отвечающая средней скорости $V^2/2g$	м			
	Разность скоростных высот $(U^2/2g - V^2/2g)$	м			

1. Для сечения III-III (см графу 6) числовые значения величин (см. позиции 5 и 8...12) те же, что и для сечения II-II.
2. Потери полного напора  $h_w$  (см. позицию 6) между сечениями II-II и III-III принять равными потерям напора между сечениями I-I и II-II.
3. Остальные величины для сеч. III-III (см. позиции 4) следует определить с привлечением уравнения Д. Бернулли (см. уравнение 1).

Учебная литература к работе 2.

1. (с.85....94, с.97....114); 2. (с.68....75); 3. (с.37....42); 4. (с.61....64, с.68....67); 5. (с.84....88, с.28....104).

### **Работа 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИЛЛЮСТРАЦИЯ ЛАМИНАРНОГО И ТУРБУЛЕНТНОГО РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ И КРИТИЧЕСКОГО ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА**

**Вводная часть.** Многочисленными экспериментальными исследованиями установлено, что движение жидкости может происходить или при ламинарном, или при турбулентном режиме.

Ламинарный режим наблюдается при небольших скоростях движения. При этом окрашенные струйки жидкости не перемешиваются, сохраняясь по всей длине потока, т.е. движение жидкости при ламинарном режиме является струйчатым, перемешивание частиц жидкости отсутствует.

Турбулентный режим наблюдается при значительных скоростях и характеризуется интенсивным перемешиванием частиц жидкости, что обуславливает пульсацию скоростей и давления,

Средняя скорость потока, при которой происходит смена режима движения жидкости, называется критической ( $v_{кр}$ ). Величина ее, как показывают опыты в трубопроводах круглого сечения, зависит от рода жидкости, характеризуемого динамической вязкостью  $\mu$ , и плотностью, а также от диаметра трубопровода  $d$ . Одновременно опытами установлено, что величина безразмерного алгебраического комплекса, отвечающей критической скорости  $v_{кр}$ ,

$$Re_{кр(d)} = \frac{v_{кр} d \rho}{\mu} = \frac{v_{кр} d}{\nu} \approx 2320 = const \quad (1)$$

от  $\mu$ ,  $\rho$  и  $d$  не зависит.  $Re_{кр(d)}=2320$  называется критическим числом Рейнольдса. Устойчивый ламинарный режим наблюдается при значениях числа

Рейнольдса  $Re_{(d)} = \frac{vd}{\nu} < Re_{кр(d)} \approx 2320$ , а турбулентный – при

$$Re_{(d)} > Re_{кр(d)}.$$

Таким образом, **число Рейнольдса**

$$\text{Re}_{(d)} = \frac{\nu d}{\nu} \quad (2)$$

является критерием, позволяющим судить о режиме движения жидкости в круглой трубе, работающей полным сечением.

Величину  $\nu = \mu/\rho$ , входящую в формулу (1) и (2), называют кинематическим коэффициентом вязкости жидкости.

Из изложенного следует, что для определения режима движения жидкости в круглом трубопроводе при напорном движении достаточно вычислить по формуле (1) число Рейнольдса и сравнить его с критическим.

Знание режима, движения жидкости необходимо для правильной оценки потерь напора при гидравлических расчетах. Дело в том, что, как показывают опыты в круглых трубах при напорном равномерном движении (результаты их представлены на рис. 8 в виде графика зависимости потерь напора по длине  $h_e$  от средней скорости  $\nu$ ).

При ламинарном режиме потери напора  $h_e$  пропорциональны средней скорости  $\nu$  в первой степени, а при турбулентном - в степени  $1,75 < m > 2,0$ . Заметим, что с помощью этого графика определяют величину критической скорости  $\nu_{кр}$ , а через нее - и критическое число Рейнольдса по формуле (1).

**Цель работы.1.** Убедиться на опыте путем окрашивания струйки воды в стеклянной трубе в существовании ламинарного и турбулентного режимов.

2. Вычислить по данным опытов, проведенных на этой трубе, числа Рейнольдса при ламинарном и турбулентном режимах, сравнить их с критическим, убедиться, что при ламинарном режиме  $\text{Re} < \text{Re}_{кр}$ , а при турбулентном –  $\text{Re} > \text{Re}_{кр}$ .

3. Построить по опытным данным, полученным на винипластовой трубе, график  $\lg h_e = f(\lg \nu)$ , определить с его помощью критическую скорость  $\nu_{кр}$ , а через нее вычислить критическое число  $\text{Re}_{кр} = 2320$ .

4. Подтвердить с помощью графика  $\lg h_e = f(\lg \nu)$ , что при ламинарном

режиме потери напора по длине  $h_e$  пропорциональны средней скорости в первой степени, а при турбулентном - в степени  $1,75 \leq m \leq 2$ .

**Описание установки** (рис. 7.) включает в себя две расположенные горизонтально трубы: стеклянную 1 ( $d=1,6$  см) и винипластовую 2 ( $d=0,9$  см), в которых и изучается движение воды при различных режимах, напорный бак 3, емкость 11 с раствором красителя, подаваемого открытием краника 10 по трубке 9 во входное сечение трубы 1. Для измерения расхода воды в трубах 1 и 2 служат мерная емкость 16 и секундомер 15.

Вода в напорный бак 3 подается по питающему трубопроводу 4 открытием вентиля 5 из резервуара лаборатории. Для поддержания уровня воды в баке 3 во время опытов на постоянной отметке имеется переливное устройство 6, для контроля за уровнем воды служит электрический уровнемер 7 со световой сигнализацией.

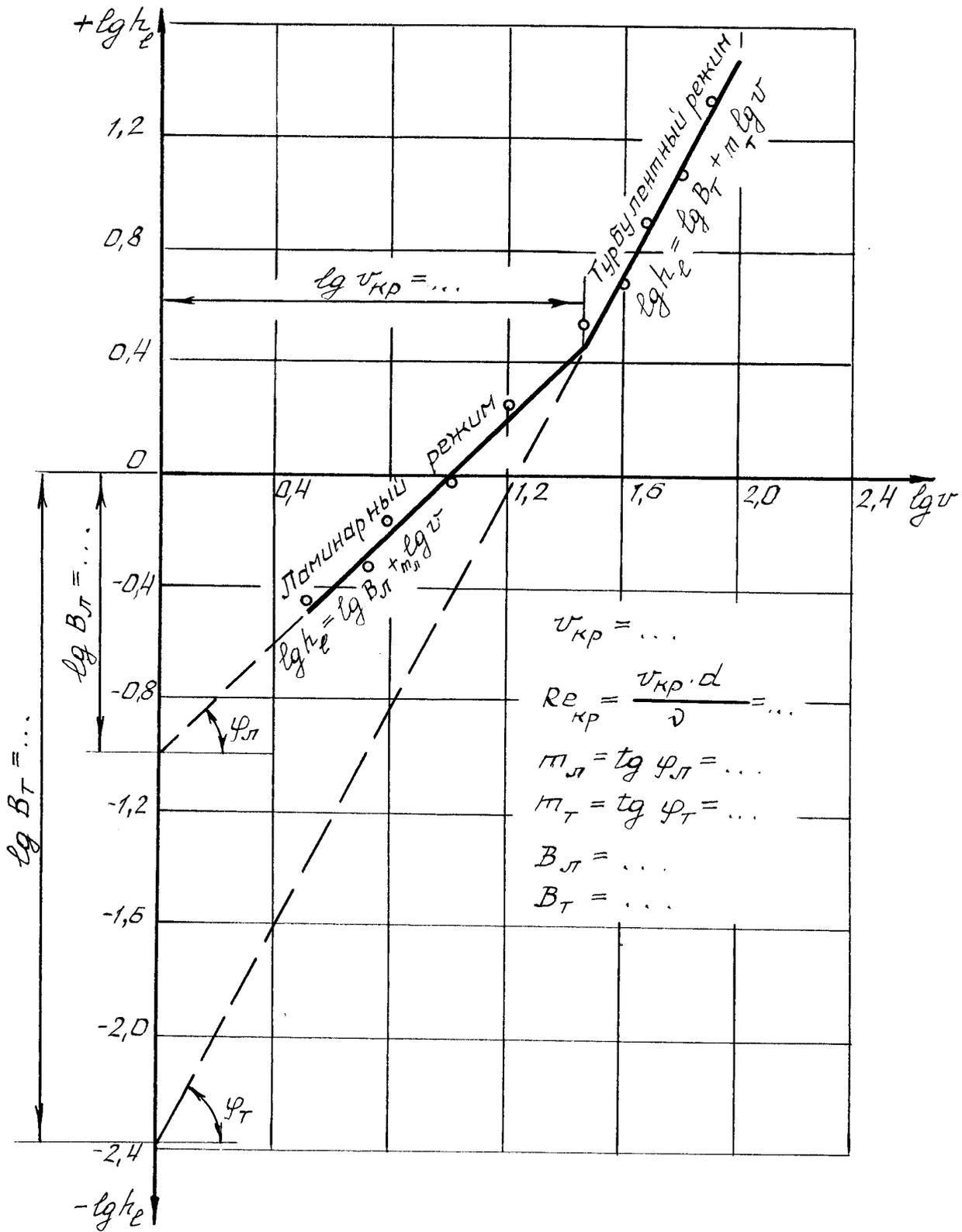


Рис. 6. График зависимости потерь напора по длине  $h_e$  от средней скорости  $v$  в логарифмической форме

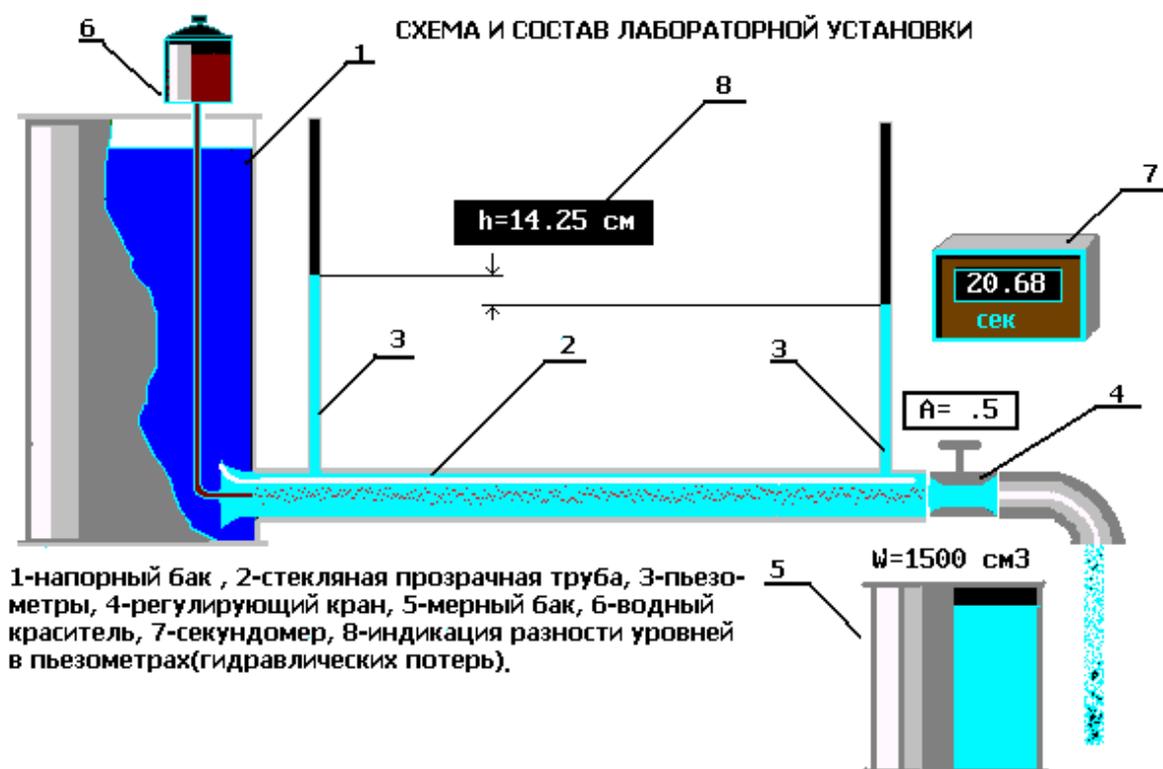


Рис. 8. Схема установки

Температура воды в баке 3 измеряется термометром 8.

Регулирование расхода воды, а следовательно и средней скорости ее движения в трубах 1 и 2, осуществляется кранами соответственно 14 и 13. На винипластовой трубе 2 имеются пьезометры 12 для определения потерь напора по длине  $h_c$  (по разности их показаний).

### **Порядок выполнения работ и обработка опытных данных**

1. Открыть вентиль 5 на трубопроводе 4 и наполнить водой бак 3 настолько, чтобы переливное устройство 6 начало работать, после чего вентиль 5 прикрыть.

2. Открыть незначительно кран 14 на стеклянной трубе 1, чтобы скорость движения воды в ней была небольшой (вода из трубы 1 должна течь тонкой струйкой).

3. Приоткрыть краник 10 на трубке 9 и подать из емкости 11 в трубу 1 небольшое количество раствора красителя, чтобы окрашенная струйка воды представляла собой отчетливо выраженную нить по всей длине трубы.

4. Измерять о помощью мерного сосуда 16 и секундомера 15 расход воды  $Q$  в трубе. При этом измеряемый объем воды в сосуде 16 должен быть также, чтобы время наполнения составляло не менее 20...30 секунд.

5. Измерить температуру воды в баке 3 термометром 8.

6. Результаты измерений записать в табл.1.4.

7. Увеличить открытием крана 14 скорость движения воды в трубе 1, но так, чтобы окрашенная струйка жидкости сохранялась, т.е. чтобы режим остался ламинарным, и выполнив те же измерения, что и в первом опыте, записать их результаты в табл. 3.

8. Дальнейшим увеличением открытия крана 14 создать в трубе 1 турбулентный режим (об этом будет свидетельствовать интенсивное перемешивание с водой раствора красителя, подачу которого следует увеличить, чтобы эффект был ярче) и выполнить третий и четвертый опыты так, как описано выше. После чего закрыть краник 10 и кран 14. Результаты измерений записать в табл.3.

9. Открыть кран 13 на винипластовой трубе 2 так, чтобы разность показаний пьезометров 12 составляла не более 0,3 см и измерить расход воды и ее температуру. Результаты измерений записать в таблицу 4.

10. Сделать ещё девять аналогичных опытов, увеличивая в каждом последующем опыте открытие крана 13 так, чтобы разность показаний пьезометров 12 (потеря напора по длине  $h_e$ ) при этом возрастала примерно в 1,5...1,6 раза. Результаты измерений записать в таблицу 4.

11. Выполнить все вычисления, предусмотренные таблицами 3 и 4.

1. Построить в масштабе по данным таблицы 4 график  $\lg h_e = f(\lg v)$  (см. рис. б) и определить с его помощью критическую скорость  $v_{кр}$ , а через неё

и  $R_{e_{крон}} = \frac{v_{кр} \cdot d}{\nu}$ , а также показатели степени  $m_l$  и  $m_m$  и коэффициенты пропорциональности  $B_l$  и  $B_m$ .

2. Дать заключение по результатам работы.

Таблица 3

№ пози- ций	Наименование и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Рез. измерений и вычислений			
			Ламин. режим		Турбул. режим	
			опыт 1	опыт 2	опыт 3	опыт 4
1	2	3	4	5	6	7
1	Объём воды в мерном сосуде $W$	см <sup>3</sup>				
2	Время наполнения объёма $t$	с				
3	Расход воды $Q = W/t$	см <sup>3</sup> /с				
4	Внутренний диаметр стеклянной трубы $d$	см				
5	Площадь попереч. сечения трубы $\omega = \pi d^2/4$	см <sup>2</sup>				
6	Средняя скорость движе- ния воды $v = Q/\omega$	см/с				
7	Температура воды	°C				
8	Кинематический коэф- фициент вязкости воды $\nu$ (по справочнику)	см <sup>2</sup> /с				
9	Число Рейнольдса $R_{ed} = \frac{v \cdot d}{\nu}$	-				
10	Критическое число Рей- нольдса $R_{exp(d)}$ (по спра- <small>спр</small> вочнику)	-				

Таблица 4

№ пози- ций	Наименование и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений									
			номера опытов									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Объём воды в мерном со- суде $W$	см <sup>3</sup>										
2	Время наполнения $t$	с										
3	Расход воды $Q = W/t$	см <sup>3</sup> /с										
4	Внутренний диаметр трубы $d$	см										
5	Площадь попереч. сечения трубы $\omega = \pi d^2/4$	см <sup>2</sup>										
6	Средняя скорость потока $\nu = Q/\omega$	см/с										
7	Логарифм средней скоро- сти $\lg \nu$	-										
8	Отметка уровня воды в пьезометре 1, $\nabla_1$	см										
9	Отметка уровня воды в пьезометре	см										
10	Потеря напора по длине $h_e = \nabla_1 - \nabla_2$	см										
11	Логарифм потерь напора по длине $\lg h_e$	-										
12	Температура воды	°C										
13	Кинематический коэффи- циент вязкости воды $\nu$ (по справочнику)	см <sup>2</sup> /с										

## Основные контрольные вопросы:

1. Назовите режимы движения жидкости и укажите их характерные особенности.
2. Поясните, что такое критерий Рейнольдса, и назовите факторы, от которых он зависит.
3. Поясните, что такое критическое число Рейнольдса?
4. Поясните, каким образом при гидравлических расчётах определяют режим движения жидкости и, с какой целью?
5. Поясните, что такое критическая скорость, от каких факторов она зависит и как её определяют?
6. Напишите и поясните аналитические зависимости потерь напора по длине от средней скорости потока при ламинарном и турбулентном режимах движения жидкости.
7. Изобразите график зависимости потерь напора по длине от средней скорости (в логарифмических координатах) и дайте пояснения к нему.

Учебная литература к работе 3.

1. (с.124....128, с.140....144); 2. (с.147....152); 3. (с.62....65, с.69....72. с.82....84); 4. (с.76....81); 5. (с.110....118).

#### **Работа 4. ИЗУЧЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НАПОРНОГО ТРУБОПРОВОДА С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ И МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ**

**Вводная часть.** Экспериментальными исследованиями установлено, что при движении жидкости часть полного напора (энергии) затрачивается на преодоление работы вязкостных и инерционных сил, т.е. возникают **потери напора**.

При равномерном движении жидкости гидравлическое сопротивление, проявляющееся равномерно по всей длине потока, называют сопротивлением по длине, а вызываемые им потери напора, - **потерями напора по длине ( $h_e$ )**. Эти потери в круглых трубопроводах, работающих полным сечением, вычисляют по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_e = \lambda \frac{l v^2}{d 2g}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  - безразмерный коэффициент, называемый коэффициентом гидравлического трения (**коэффициентом Дарси**). Величина коэффициента  $\lambda$  характеризует гидравлическое сопротивление трубопровода и зависит в общем случае от числа Рейнольдса  $Re$  и относительной шероховатости  $\Delta_s/d$  трубопровода, т.е.  $\lambda=f(Re, \Delta_s/d)$ ;

$l, d$  – длина и внутренний диаметр трубопровода;

$v$  – средняя скорость движения потока жидкости.

Величину коэффициента  $\lambda$  при гидравлических экспериментах вычисляют по опытным данным из формулы (1). При гидравлических же расчетах – по эмпирическим и полуэмпирическим формулам, например, при ламинарном режиме  $\lambda_n=64/Re$ , а при турбулентном режиме движения и работе трубопровода в области доквадратичного сопротивления – по формуле А.Д. Альтшуля:

$$\lambda_{\text{до кв.}} = 0,11 \left( \frac{\Delta_{\text{э}}}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} \quad (2)$$

Величину **абсолютной эквивалентной шероховатости**  $\Delta_{\text{э}}$  при расчетах берут из справочной литературы в зависимости от материала трубопровода и состояния его внутренней поверхности. Например, для труб из органического стекла  $\Delta_{\text{э}}=0,006$  мм, а для стальных водопроводных умеренно заржавленных труб  $\Delta_{\text{э}}=0,20 \dots 0,50$  мм.

Область гидравлического сопротивления при расчетах определяют или непосредственно по графикам  $\lambda=f(\text{Re}, \Delta_{\text{э}}/d)$ , полученным опытным путем для труб из различных материалов и приведенным в справочной литературе, например, по графику Никурадзе (рис. 8), или же с помощью соотношений  $\frac{10d}{\Delta_{\text{э}}}$  и  $\frac{500d}{\Delta_{\text{э}}}$ , предложенных А. Д. Альтшулем на основе использования упомянутых графиков. В последнем случае поступают следующим образом.

Вычисляют соотношения  $10d/\Delta_{\text{э}}$  и  $500d/\Delta_{\text{э}}$  и сравнивают их с числом Рейнольдса  $\text{Re} = Vd/\nu$ . При этом, если,  $\text{Re} \geq \frac{500d_{\text{э}}}{\Delta_{\text{э}}}$ , трубопровод работает в области **гидравлически гладких труб**. Если  $\text{Re} \leq \frac{10d}{\Delta_{\text{э}}}$ , трубопровод работает в области **квадратичного сопротивления**. Если же  $10d/\Delta_{\text{э}} < \text{Re} < 500d_{\text{э}}/\Delta_{\text{э}}$ , трубопровод работает в области **доквадратичного сопротивления**.

Следует иметь в виду, что для каждой области гидравлического сопротивления предложены и используются при гидравлических расчетах свои формулы для вычисления коэффициента  $\lambda$ .

Другой вид гидравлических сопротивлений, возникающих в местах резкого изменения конфигурации потока, называют местным сопротивлениями, а вызываемые ими потери напора, - **местными потерями напора** ( $h_{\text{м}}$ ).

При прохождении через любое местное сопротивление поток жидкости деформируется (рис. 9 а, б), вследствие чего движение становится неравномерным резко изменяющимся, для которого характерны:

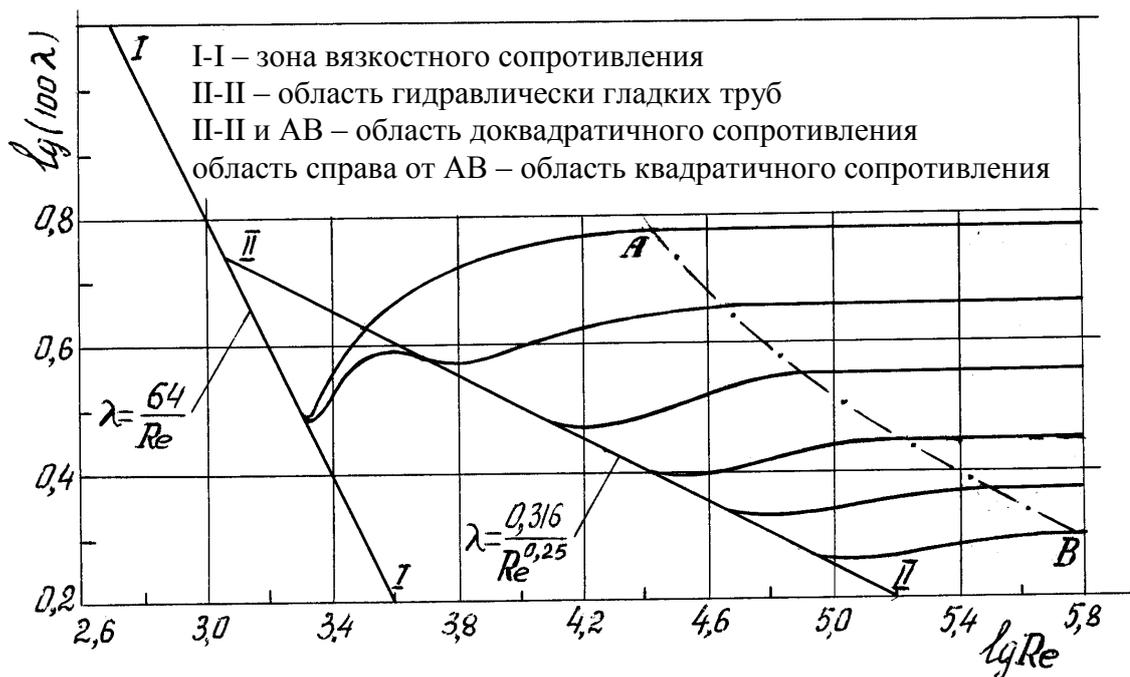


Рис. 8. график зависимости коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  от числа Рейнольдса  $Re$  для труб с различной относительной шероховатостью  $\Delta/d$  (график Никурадзе)

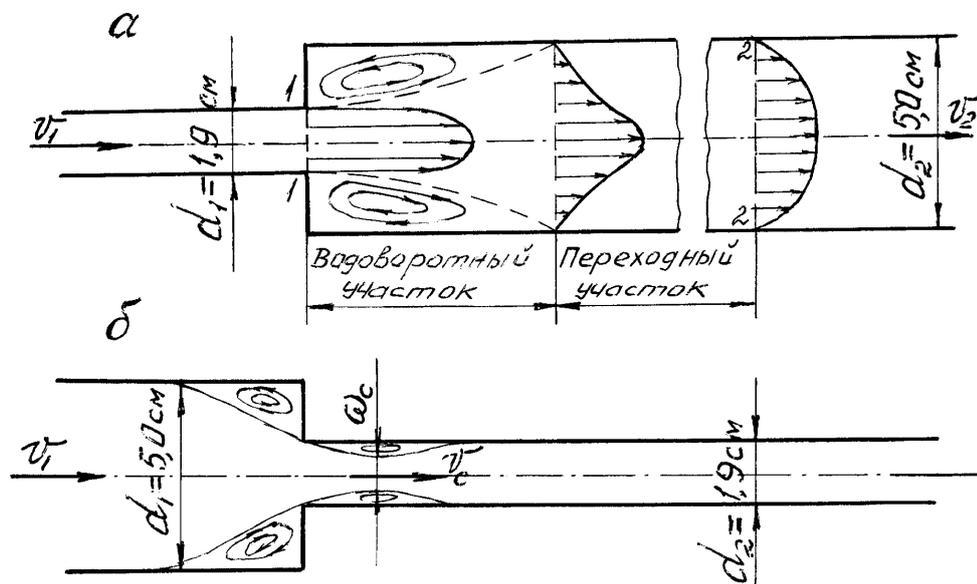


Рис. 9. Схемы движения жидкости при резком (внезапном) изменении сечения трубопровода:

- а) резкое расширение трубопровода;
- б) резкое сужение трубопровода

- а) значительное искривления линий потока и кривых сечений потока;
- б) отрывы транзитной струи от стенок трубопровода (ввиду действия закона инерции) и возникновения в местах отрыва устойчивых водовязатов;
- в) повышенная (по сравнению с равномерным движением) пульсация скоростей и давлений;
- г) изменение формы (переформирование) эпюр скоростей.

Местные потери напора при гидравлических расчетах вычисляются по формуле Вейсбаха:

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (3)$$

где  $\zeta$  - безразмерный коэффициент, называемый **коэффициентом местного сопротивления**;

$v$  - средняя скорость потока в сечении за местным сопротивлением, т.е. ниже по течению (если скорость  $v$ , как исключение, принимается перед местным сопротивлением, это обязательно оговаривается).

Величина коэффициента  $\zeta$  зависит в общем случае от числа Рейнольдса  $R_e$  и от конфигурации, т.е. формы проточной части местного сопротивления. В частном случае, когда трубопровод, на котором расположено местное сопротивление, работает в области квадратичного сопротивления, величина коэффициента  $\zeta$  от  $R_e$  не зависит.

Величину  $\zeta$  для каждого вида местного сопротивления определяют по данным гидравлических экспериментов, пользуясь формулой (3). Полученные таким образом значения коэффициентов  $\zeta$  для различных видов местных сопротивлений (обычно при квадратичной области сопротивления) приводятся в справочной и специальной литературе, откуда и берутся при гидравлических расчетах. Исключением является резкое расширение и резкое сужение трубопровода (см. рис. 9 а, б), для которых численные значения коэффициента  $\zeta$  определяются по формулам, полученным теоретически. Так, при резком расшире-

нии трубопровода, когда средняя скорость в формуле (3) взята перед местным сопротивлением, т.е.  $U_1$ ,

$$\zeta'_{pp} = (1 - \omega_1/\omega_2)^2, \quad (4)$$

если же скорость берется за местным сопротивлением, т.е.  $U_2$ ,

$$\zeta''_{pp} = (\omega_2/\omega_1 - 1)^2. \quad (5)$$

Коэффициент сопротивления при резком сужении трубопровода ( $\zeta_{p.c.}$ ) принято относить к скорости после сужения. При этом

$$\zeta_{p.c} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)^2, \quad (6)$$

где  $\varepsilon = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \omega_2/\omega_1}}$  - коэффициент сжатия струи.

**Цель работы:** 1. Определить по опытным данным, воспользовавшись формулами (1) и (3), значение коэффициента гидравлического трения  $\lambda_{on}$  и величины коэффициента  $\zeta$  для трех видов местных сопротивлений;

2. Установить, воспользовавшись соотношениями А.Н. Альтшуля или же графиком Никурадзе (см. рис. 8) области гидравлического сопротивления, в которых работали участки напорного трубопровода;

3. Вычислить значения коэффициентов гидравлического трения  $\lambda$  по соответствующим эмпирическим формулам;

4. Найти справочные значения коэффициентов местных сопротивлений ( $\zeta_{p.нов.}$  по таблице,  $\zeta_{pp}$  и  $\zeta_{p.c.}$  вычислить по формулам (5), (6));

5. Оценить сходимость  $\lambda_{on}$  и  $\zeta_{on}$  с их расчетными справочными значениями.

**Описание установки.** Установка (рис. 10) представляет собой систему напорных трубопроводов с последовательно расположенными на нем гидравлическими сопротивлениями (по длине и местными). К каждому гидравлическому сопротивлению подключено по два пьезометра (перед и за ним). Все пьезометры для удобства работы выведены на щит 4. Для регулирования расхода воды  $Q$  в си-

стеме служит вентиль 2. Величина  $Q$  измеряется с помощью мерного бака 1 и секундомера. 3. Подача воды в систему осуществляется из питающего резервуара 5 по трубе 7 открытием задвижки 6. Постоянный уровень воды в резервуаре 5 (для обеспечения установившегося движения в системе) поддерживается переливным устройством. Вода в резервуар 5 подается центробежным насосом.

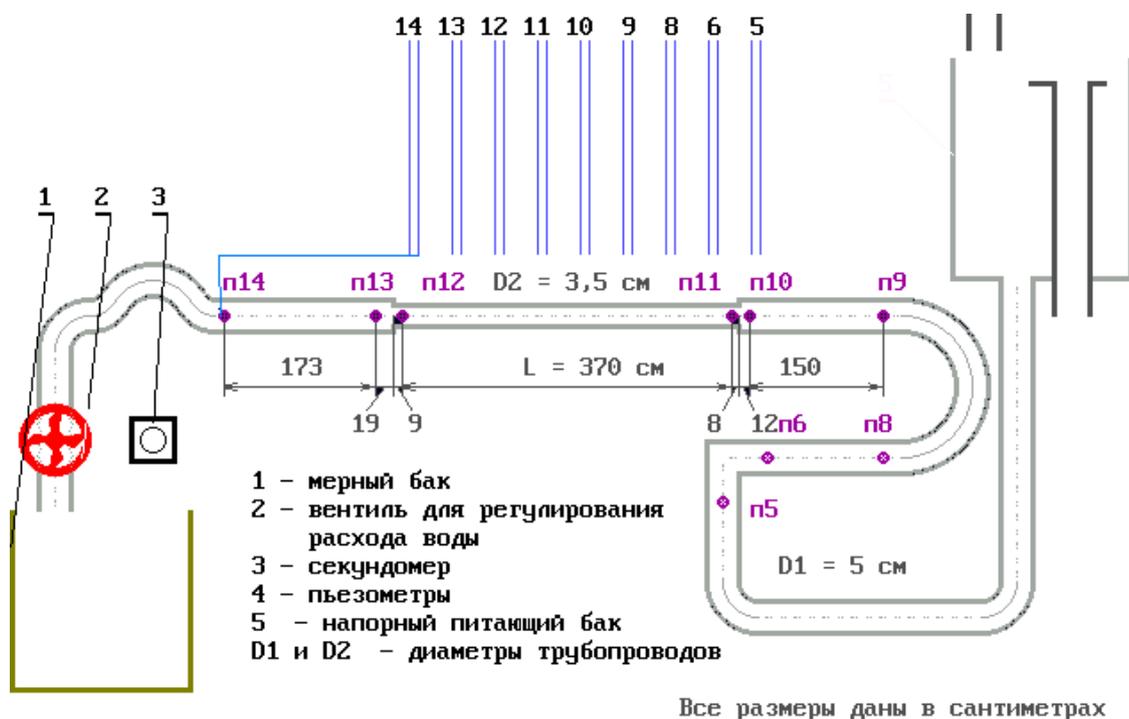


Рис. 10. Схема установки

### Порядок выполнения работы и обработка опытных данных.

При закрытом вентиле 2 и задвижке 6 включить насос и обеспечить подачу воды в питающий резервуар 5. После наполнения водой резервуара и стабилизации уровня воды в нем (переливное устройство должно при этом работать) следует плавным открытием вентиля 2 подать воду в систему трубопроводов. Далее, необходимо измерить: отметки уровней воды в пьезометрах, расход воды в системе (с помощью мерного бака 1 и секундомера 3), а так же ее температуру (термометром в резервуаре 1). Результаты измерений для двух опытов (при разных расходах воды) записать в таблицу 5.

Обработать опытные данные и результаты представить в виде таблицы 5  
 Сформировать выводы по результатам работы.

Таблица 5

	Наименование измеряемых и вычисляемых величин	Ед.измерен.	Участок прямой трубы 1		Участок прямой трубы 2		Внезап. сужение потока		Внезап. расшир. потока		Участок прямой трубы 3	
			9	10	11	12	10	11	12	13	13	14
1	Номера сечений											
2	Диаметр трубы, D	м										
3	Пл. сечения, $S=\pi D^2/4$	м <sup>2</sup>										
4	Показания пьезометра (отметка уровня воды в нем)	м										
5	Мерный объем жидкости, W	м <sup>3</sup>										
6	Время наполнения мерного объема, t	с										
7	Температура воды, T	С°										
8	Длина участка прямой трубы, L	м										
9	Расход воды, $Q=W/t$	$\frac{м^3}{с}$										
10	Скоростной напор в сечении $V^2/2g = (Q/S)^2/2g$	м										
11	Полный напор в сечении, $H_i=(z+p/\rho g+v^2/2g)_i$	м										
12	Местные потери напора, $h_m$	м										
13	Потери по длине, $h_L$	м										
14	Опытный коэф-фиц.местных потерь	$\zeta_{оп}$										
15	Справочный коэф-фиц.мест.потерь	$\zeta_{сп}$										
16	Число Рейнольдса Re											
17	Опытный коэффиц. гидрав. трения	$\lambda_{оп}$										
18	Расчетный коэф-фиц..гидрав. трения	$\lambda_{рс}$										

### **Основные контрольные вопросы.**

1. Напишите и поясните формулы Дарси-Вейсбаха и Вейсбаха.
2. Поясните, как опытным путем определяют величины коэффициентов  $\lambda$  и  $\xi$ .
3. Что характеризуют коэффициенты  $\lambda$  и  $\xi$  от каких факторов в общем случае они зависят и как их определяют при гидравлических расчетах?
4. Объясните, что такое  $\Delta_0$  и  $\Delta_0/d$ , как найти величину  $\Delta_0$  при гидравлических расчетах.
5. Назовите области гидравлического сопротивления трубопроводов и объясните, как определяют область сопротивления при гидравлических расчетах.
6. Изобразите схемы движения жидкости при резком повороте трубы на  $90^\circ$ , а также при резком расширении и резком сужении трубопровода и дайте пояснения к ним, указав, что характерно для движения потока при протекании его через любое местное сопротивление.

### Учебная литература к работе 4.

1. (с.159....167, с.186....193); 2. (с.147, с.168....174, с.201....213); 3. (с.48....57, с.87....91, с.93....96, с.100....101); 4. (с.98....106); 5. (с.160....166, с.174....176, с.189....198).

## **Работа 5. ИЗУЧЕНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ МАЛЫЕ ОТВЕРСТИЯ В ТОНКОЙ СТЕНКЕ И НАСАДКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ В АТМОСФЕРУ**

**Вводная часть.** Малым считаются отверстие, высота которого не превышает  $0,1 H$  (рис. 3). Здесь  $H$  - превышение свободной поверхности жидкости над центром тяжести отверстия.

Стенку считают тонкой, если ее толщина  $\delta < (1,5...3,0)d$  (см.рис. 3). При выполнении этого условия величина  $\delta$  не влияет на характер истечения жидкости из отверстия, так как вытекающая струя жидкости касается только острой кромки отверстия.

Поскольку частицы жидкости движутся к отверстию по криволинейным траекториям сил инерции струя, вытекающая из отверстия, сжимается. Благодаря действию сил инерции струя продолжает сжиматься и после выхода из отверстия. Наибольшее сжатие струи, как показывают опыты, наблюдается в сечении с-с на расстоянии примерно  $(0,5...1,0)d$  от входной кромки отверстия (см.рис. 3). Это сечение называют сжатым. Степень сжатия струи в этом сечении оценивают **коэффициентом сжатия**  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}, \quad (1)$$

где  $\omega_c$  и  $\omega$  соответственно площадь сжатого живого сечения струи и площадь отверстия.

Среднюю скорость струи  $V_c$  в сжатом сечении с-с при  $p_0 = p_{ат}$  вычисляют по формуле, полученной из уравнения Д. Бернулли, составленного для сечений I-I и с-с.:

$$V_c = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  - коэффициент скорости отверстия.

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}} \quad (3)$$

На основе использования уравнения траектории струи, вытекающей из отверстия, получено еще одно выражение для коэффициента  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{x_i}{2\sqrt{y_i H}} \quad (4)$$

В формулах (3) и (4)  $\alpha$  - коэффициент Кориолиса,  $\zeta$  - **коэффициент сопротивления отверстия**,  $x_i$  и  $y_i$  - координаты произвольно взятой точки траектории струи.

Поскольку напор теряется главным образом вблизи отверстия, где скорости достаточно велики, при истечении из отверстия во внимание принимают только **местные потери напора**.

Расход жидкости  $Q$  через отверстие равен:

$$Q = V_c \omega_c = \varphi \sqrt{2gH} \varepsilon \omega = \varphi \varepsilon \omega \sqrt{2gH}, \quad (5)$$

где

$$\varphi \varepsilon = \mu \quad (6)$$

Здесь  $\mu$  - коэффициент расхода отверстия, учитывающий влияние гидравлического сопротивления и сжатия струи на расход жидкости. С учетом выражения для  $\mu$  формула (5) принимает вид:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}. \quad (7)$$

Величины коэффициентов  $\varepsilon$ ,  $\zeta$ ,  $\varphi$ ,  $\mu$  для отверстий определяют опытным путем. Установлено, что они зависят от формы отверстия и числа Рейнольдса. Однако при больших числах Рейнольдса ( $Re \geq 10^5$ ) указанные коэффициенты от  $Re$  не зависят и для круглых и квадратных отверстий при совершенном сжатии струи равны:  $\varepsilon = 0,62 \dots 0,64$ ,  $\zeta = 0,06$ ,  $\varphi = 0,97 \dots 0,98$ ,  $\mu = 0,60 \dots 0,62$ .

Насадкой называют патрубок длиной  $2,5d \leq L_H \leq 5d$  (рис. 4), присоединенный к малому отверстию в тонкой стенке с целью изменения гидравлических характеристик истечения (скорости, расхода жидкости, траектории струи).

Насадки бывают цилиндрические (внешние и внутренние), конические (сходящиеся и расходящиеся) и коноидальные, т.е. очерченные по форме струи, вытекающей из отверстия.

Использование насадки любого типа вызывает увеличение расхода жидкости  $Q$  благодаря вакууму, возникающему внутри насадка в области сжатого сечения с-с (см.рис.4) и обуславливающему повышение напора истечения.

Среднюю скорость истечения жидкости из насадки  $V$  и расход  $Q$  определяют по формулам, полученным из уравнения Д. Бернулли, записываемого для сечений 1-1 и в-в (см.рис.4).



Рис. 11. Схема установки

$$V = \varphi_H \sqrt{2gH} \quad (8)$$

Здесь  $\varphi_H = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_H}}$  - коэффициент скорости насадки,

$\zeta_H$  - коэффициент сопротивления насадки.

Для выходного сечения веществ коэффициент сжатия струи  $\varepsilon=1$  (насадка в этой области работает полным сечением), поэтому коэффициент расхода насадки  $\mu_H = \varphi_H$ .

Расход жидкости вытекающий из насадки, вычисляется по формуле, аналогичной формуле (7),

$$Q = \mu_H \omega \sqrt{2gH}. \quad (9)$$

**Цель работы.** 1. Определить по опытным данным величины коэффициентов:  $\mu_{оп}$ ,  $\varphi_{оп}$ ,  $\varepsilon_{оп}$ ,  $\zeta_{оп}$ , при истечении через малое круглое отверстие диаметром  $d=2$  см при постоянном напоре в атмосферу и величины коэффициентов  $\mu_{Ноп} = \varphi_{Ноп} = \zeta_{Ноп}$  для внешнего цилиндрического и конических (сходящегося и расходящегося) насадков при  $H = \text{const}$  в атмосферу.

2. Сравнить значения коэффициентов, полученные в опытах, со справочными и подсчитать относительные отклонения.

**Описание установки.** Установка (рис.11) представляет собой напорный резервуар 1, в боковой поверхности которого имеется отверстие 9, закрываемое рычажным клапаном 3. Перед отверстием 9 (снаружи резервуара 1) смонтирован поворотный круг 10 с отверстиями различной формы и насадками различных типов. Поворачивая круг, можно установить против отверстия 9 насадок нужного типа или отверстие требуемой формы. Вода в резервуаре 1 подается по трубопроводу 14 открытием задвижки 15. Постоянный уровень воды в резервуаре 1 во время опытов поддерживается переливной трубой II, а ослабление возмущений, создаваемых поступающей в него водой, осуществляется успокоительной решеткой 2.

Для определения напора истечения  $H$  резервуар I снабжен водомерной трубкой 12 со шкалой, нуль которой совмещен с центром отверстия 9.

Расход воды при истечении из отверстий и насадков измеряется с помощью передвижного мерного бака 5 и секундомера. Для опорожнения мерного бака имеется вентиль 8.

Координаты  $X$  и  $Y$  произвольных точек траектории струи измеряются с помощью координатной сетки, нанесенной на поворачивающийся щит 4.

### **Порядок выполнения работы и обработка опытных данных.**

1. Открыть задвижку 15, заполнить водой резервуар настолько, чтобы работала переливная труба II.

2. Поворотом круга 10 установить перед отверстием 9 круглое отверстие диаметром  $d=2$  см и закрепить круг в этом положении.

3. Открыть клапан 3 и обеспечить с помощью задвижки 15 истечение воды при постоянном напоре  $H$ , измерить его, а также координаты  $X_k$  и  $Y_k$  произвольно выбранной точки “к” траектории струи.

4. Измерить расход воды  $Q$  с помощью бака 5 и секундомера (измеряемый объем воды должен быть не менее 50 литров).

5. Результаты измерений записать в графу 4 таблицы 1.8.

6. Закрыть клапаном 3 отверстие 9 и опорожнить вентилем 8 мерный бак 5.

7. Устанавливая с помощью поворотного круга 10 против отверстия 9 поочередно внешний цилиндрический и конические (сходящийся и расходящийся) насадки, измерить для каждого из них расход воды  $Q$  и напор  $H$  (последний должен поддерживаться в опытах постоянным и равным напору при истечении из круглого отверстия).

8. Результаты измерений записать в таблицу 6 (графы 5...7)

9. Обработать опытные данные, выполнив все вычисления, предусмотренные таблицей 6.

10. Дать заключение по результатам работы.

Таблица 6

№ по- зиц.	Наименования измеряемых и вычисляемых величин	Ед. Изм.	Результаты измерений и вычислений				
			круг. отвер- вер- стие	насадки			
				внешн. цилинд.	ко- нич. сход	конич. расход	
1	2	3	4	5	6	7	
1	Диаметры отверстия и насадков на вы- ходе $\alpha$	$м$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	
2	Площади круглого отверстия и наса- док на выходе $\omega = \pi d^2/4$	$м^2$					
3	Объем воды в мерном баке $W$	$м^3$					
4	Время наполнения $t$	$с$					
5	Расход воды $Q = W/t$	$м^3/с$					
6	Напор истечения $H$	$м$					
7	Координаты произвольной точ- ки «К» траектории струи, выте- кающей из круглого отверстия	$X_k$	$м$	...	-	-	-
		$Y_k$	$м$	...	-	-	-
8	Коэффициенты расхода отверстия и насадок (по опыту) $\mu_{on} = Q/\omega\sqrt{2gH}$	-					
9	Коэффициенты скорости насадок (по опыту) $\varphi_{H_{on}} = \mu_{H_{on}}$	-	-	...	...	...	
10	Коэффициент скорости отверстия (по опыту) $\varphi_{on} = X_k/(2\sqrt{Y_k \cdot H})$	-	...	-	-	-	
11	Коэффициент сопротивления отверстий и насадок (по опыту) $\zeta_{on} = 1/\varphi_{on}^2 - 1$	-					
12	Коэффициент сжатия отверстия и насадок (по опыту) $\varepsilon_{on} = \mu_{on}/\varphi_{on}$						
13	Справочные значения коэффициентов рас- ходы, скорости, со- противления и сжатия для отверстия и наса- док.	$\mu_{cnp}$	-				
		$\varphi_{cnp}$	-				
		$\zeta_{cnp}$	-				
		$\varepsilon_{cnp}$	-				
14	Относительные от- клонения коэффици- ентов расхода, скоро- сти, сопротивления и сжатия для отверстия и насадок	$\Delta_{\mu} = \frac{(\mu_{cnp} - \mu_{on})}{\mu_{cnp}}$					
		$\Delta_{\varphi} = \frac{(\varphi_{cnp} - \varphi_{on})}{\varphi_{cnp}}$					
		$\Delta_{\zeta} = \frac{(\zeta_{cnp} - \zeta_{on})}{\zeta_{cnp}}$					
		$\Delta_{\varepsilon} = \frac{(\varepsilon_{cnp} - \varepsilon_{on})}{\varepsilon_{cnp}}$					

## Основные контрольные вопросы

1. Что понимают под малым отверстием в тонкой стенке при истечении жидкости из отверстий?
2. Сжатое сечение, причины сжатия струи, чем оценивают величину сжатия струи?
3. Что называют насадкой, типы насадок, их назначение?
4. Коэффициент скорости. Что он учитывает, как определяется?
5. Коэффициент расхода. Что он учитывает, как определяется?
6. Коэффициент сопротивления (отверстия, насадка). Как он определяется по опытным данным?
7. Объясните, почему при истечении из насадок расход жидкости больше, чем при истечении из малого круглого отверстия в тонкой стенке?
8. Напишите и поясните формулы для определения скорости и расхода при истечении жидкости из отверстий и насадок в атмосферу при постоянном напоре.
9. Изобразите и поясните схемы истечения жидкости из малого отверстия в тонкой стенке и через внешний цилиндрический насадок в атмосферу.

Учебная литература к работе 5.

1. (с.379....385, с.389....393, с.398....399); 2. (с.284....288, с.291....297); 3. (с.106....109, с.115); 4. (с.106....112); 5. (с.199....210, с.215....220, с.222....225).

## **Работа 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРЯМОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ**

**Вводная часть.** Гидравлическим ударом называется изменение (повышение или понижение) давления в напорном трубопроводе при резком изменении скорости движения жидкости (например, в результате резкого закрытия или открытия затвора).

Повышения давления при гидравлическом ударе может быть настолько большим, что способно привести к разрыву трубопровода.

При быстром закрытии затвора сначала остановится не вся масса жидкости, заключенная в трубопроводе, а лишь часть ее, находящаяся непосредственно перед затвором (рис.12). Это происходит благодаря инерции и упругим свойствам жидкости и материала трубы (остановившаяся масса жидкости несколько сжимается, труба расширяется, а давление в жидкости резко возрастает). Затем повышение давления весьма быстро распространяется по трубопроводу от затвора к резервуару. Скорость распространения повышения давления называют **скоростью распространения ударной волны С**. После того как во всем трубопроводе давление повысится, жидкость начнет выходить из зоны повышенного давления обратно в резервуар и давление в трубопроводе начнет понижаться. Затем в зону пониженного давления снова пойдет жидкость из резервуара и давление, снова повысится. Благодаря упругим свойствам жидкости и стенок трубопровода этот процесс довольно быстро затухает. Наиболее опасным является первое повышение давления.

Ударная волна пройдет по всему трубопроводу (от затвора до резервуара) за время  $t = l/d$  (здесь  $l$  – длина трубопровода). Время одного цикла, включающего повышение и понижение давления, называются фазой удара  $T = 2l/d$

Если время закрытия  $t_3$  затвора меньше или равно фазе удара  $T$  ( $t_3 \leq T$ ), удар называется прямым.

Удар может возникнуть, например, при внезапном выключении насоса, подающего воду по нагнетательному трубопроводу в резервуар. Жидкость после

выключения насоса по инерции некоторое время будет двигаться, и в трубопроводе возникнет пониженное давление. Затем начнется обратное движение жидкости из резервуара в область пониженного давления в трубопроводе и давление здесь повысится подобно тому как это наблюдалось при прямом ударе.

Из изложенного ясно, что параметры движения жидкости при гидравлическом ударе изменяются с течением времени. Следовательно, при гидравлическом ударе движение жидкости является неустановившимся.

Для определения повышения давления  $\Delta p$  при прямом гидравлическом ударе Н. Е. Жуковским в 1898 г. предложена формула:

$$\Delta p = \rho C v, \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность жидкости;

$C$  - скорость распространения ударной волны;

$v$  - средняя скорость движения жидкости в трубопроводе до закрытия затвора (при установившемся движении).

Величину  $C$  вычисляют по формуле:

$$C = \frac{\sqrt{E_{жс}}}{\sqrt{1 + \frac{E_{жс} d}{E_{тр} \delta}}}, \quad (2)$$

где  $\sqrt{\frac{E_{жс}}{\rho}} = C_{зв}$  - скорость звука в жидкой среде (для воды  $C_{зв} \approx 1425$  м/с;

$E_{ж}$  и  $E_{тр}$  – модули упругости соответственно жидкости и материала трубопровода (для воды  $E_{в} \approx 1,96 \cdot 10^9$  Па, для стали  $E_{тр} \approx 1,96 \cdot 10^{11}$  Па);

$d$  – внутренний диаметр трубопровода;

$\delta$  - толщина стенки трубопровода.

**Цель работы.** Определить опытным путем величину повышения давления  $\Delta p_{оп}$  при прямом гидравлическом ударе в напорном трубопроводе, сравнить ее с величиной  $\Delta p$ , вычисленной по формуле Н. Е. Жуковского (см. формулу 1), и подсчитать относительное отклонение.

**Описание установки.** Установка (см.рис.12) состоит из горизонтального стального трубопровода 3, присоединенного к напорному резервуару 2, в котором уровень воды во время опытов поддерживается на постоянной отметке с помощью переливного устройства I.

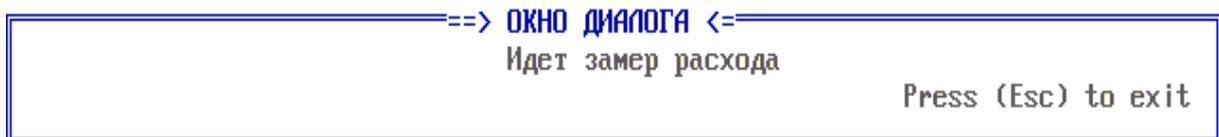
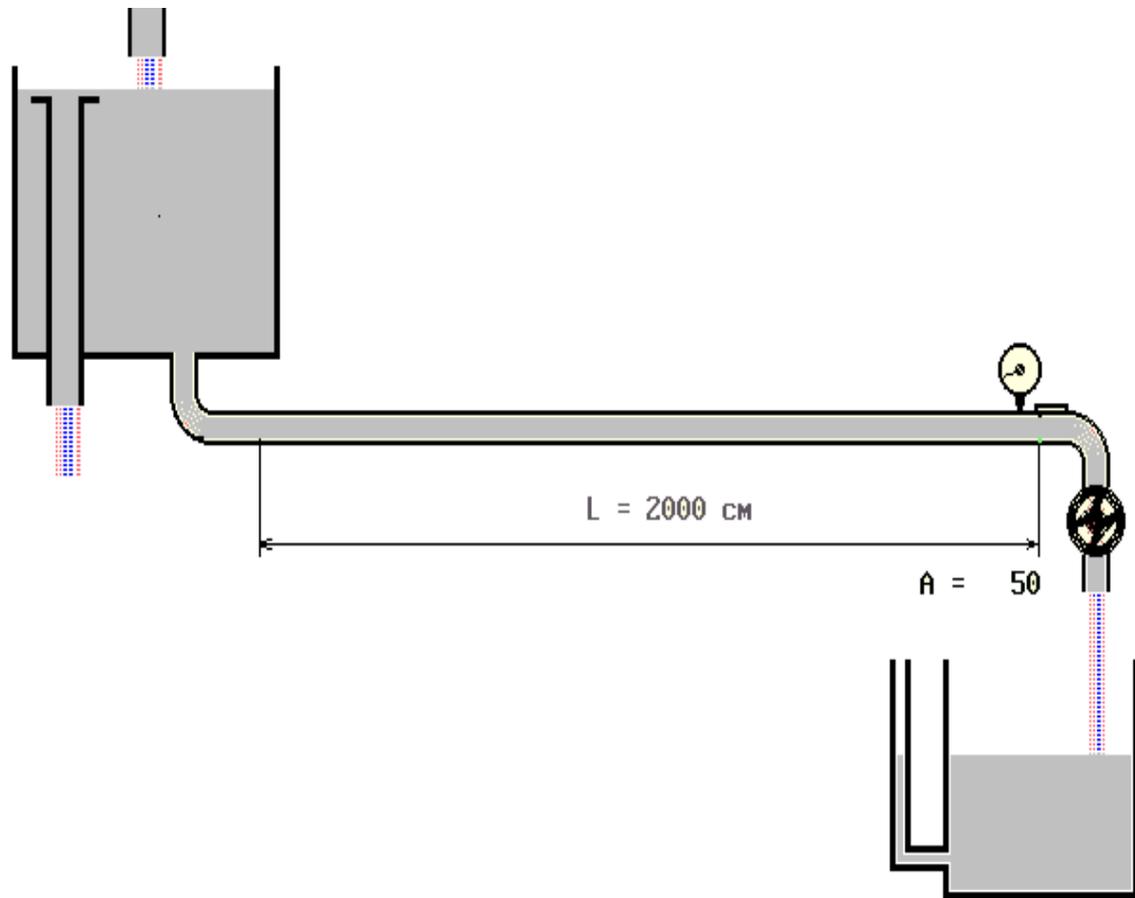


Рис. 12. Схема установки

В конце трубопровода 3 имеется вентиль 6 для регулирования скорости движения воды в нем, клапанный затвор 5, позволяющий практически мгновенно перекрывать трубопроводу пружинный манометр 4, с помощью которого измеряется давление в жидкости до и в момент закрытия затвора.

Для измерения расхода воды служит мерный бак 12 снабженный водомерной трубкой 9 со шкалой 10, и секундомер 8.

## **Порядок выполнения работы и обработка опытных данных**

1. Измерить по манометру 4 давление в трубопроводе 3 до удара (при закрытом вентиле 6) и результаты измерения записать в таблицу 7.
2. Открыв (неполностью) вентиль 6, обеспечить пропуск по трубопроводу 3 некоторого расхода воды.
3. Измерить расход воды  $Q$  с помощью мерного бака 12 и секундомера 8. При этом измеряемый объем воды должен быть не менее 50 литров.
4. Перекрыть затвором 5 трубопровод 3 и измерить по манометру 4 величину максимального давления при ударе.
5. Записать в таблицу 7 полученные при измерениях данные.
6. Сделать еще два аналогичных опыта при других расходах воды.
7. Обработать опытные данные так, как указано в таблице 7.
8. Дать заключение по результатам работы.

## **Основные контрольные вопросы**

1. Сформулируйте понятия гидравлического удара.
2. Прямой и непрямой гидравлический удар.
3. Что такое фаза удара?
4. Объясните процесс изменения давления в трубопроводе, питаемом из резервуара, при прямом гидравлическом ударе.
5. Напишите и поясните формулу Н. Е. Журавского для определения повышения давления при ударе.
6. Напишите и поясните формулу для определения скорости распространения ударной волны.

Таблица 7

№ поз.	Наименования измеряемых и вычисляемых величин	Ед. Изм.	Результаты измерений и вычислений		
			Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
1	2	3	4	5	6
1	Внутренний диаметр трубопровода d	М			
2	Толщина стенки трубопровода δ	М			
3	Площадь поперечного сечения трубопровода $\omega = \pi d^2/4$	м <sup>2</sup>			
4	Объем воды в мерном баке W	м <sup>3</sup>			
5	Время наполнения объема t	С			
6	Расход воды в трубопроводе Q = W/t	М <sup>3</sup> /с			
7	Средняя скорость движения воды в трубопроводе ( до удара) V = Q/ω	м/с			
8	Скорость распространения ударной волны $C = \frac{1425}{\sqrt{1 + E_{\sigma} d / E_{Tp} \cdot \delta}}$	м/с			
9	Повышение давления при ударе по формуле Н. Е. Жуковского Δp = ρCV	Па			
10	Давление в трубопроводе до удара ( по манометру) p <sub>1</sub>	Па			
11	Наибольшее давление в трубопроводе при ударе (по опытам) Δp <sub>оп</sub> = p <sub>2</sub> - p <sub>1</sub>	Па			
12	Повышение давления при ударе (по опытам) Δp <sub>оп</sub> = p <sub>2</sub> - p <sub>1</sub>	Па			
13	Относительное отклонение $\Delta_{\Delta p} = \frac{\Delta p - \Delta p_{оп}}{\Delta p} \cdot 100$	%			

Учебная литература к работе 6.

1. (с.356....362); 2. (с.260....264); 3. (с.140....147); 4. (с.155....160); 5. (с.179....283, с.289....293).

## Список литературы

1. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): Учебник для гидротехнических специальностей вузов. - Л. Энергоиздат, 1982 . - 672 с.
2. Альтшуль А.Д., Кисилёв П.Г. Гидравлика и аэродинамика (основы механики жидкости): Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности “Теплогазоснабжение и вентиляция”. - М.: Стройиздат, 1975 . - 327 с.
3. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов /Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. - М.: Машиностроение, 1982. - 423 с.
4. Большаков В.А., Попов В.Н. Гидравлика. Общий курс: Учебник для вузов. - Киев: Высшая школа. Головное издательство, 1989. - 215 с.
5. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. Учеб. Для вузов 3-е изд., перераб, и доп. М. Колосс 2007 г 656 с.
6. Константинов Н.М., Петров Н.А., Высоцкий Л.И. Гидравлика, гидрология, гидрометрия: Учебник для вузов: В 2 ч. Ч.1. Общие законы. - М.: Высшая школа, 1987. - 304 с.
7. Константинов Н.М., Петров Н.А., Высоцкий Л.И. Гидравлика, гидрология, гидрометрия: Учебник для вузов: В 2 ч. Ч.2. Специальные вопросы. - М. Высшая школа, 1987. - 431 с.
8. Богомолов А.И., Михайлов К.А. Гидравлика: Учебник для гидротехнических специальностей вузов. - М.,: Стройиздат, 1972 - 648 с.
9. Кисилёв П.Г. Гидравлика. Основы механики жидкости: Учебное пособие для студентов гидротехнических специальностей вузов. - М.: Энергия, 1980. - 360 с.
10. Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередат: Учебное пособие для машиностроительных вузов /Байбаков О.В., Бутаев Д.А., Калмыкова З.А. и др. - М.: Машиностроение, 1974. - 416 с.

11. Лабораторный практикум по гидравлике, гидравлическим машинам и гидроприводам: Учебное пособие для студентов вузов (Казарям С.М., Барекян А.Ш., Скубаренко Д.Д., Чельшев А.К. - Ереван: Луйс , 1984. - 319 с.

12. Яковлева Л.В. Практикум по гидравлике: Учебное пособие для учащихся с.-х. техникумов. -М.: Агропромиздат, 1990. - 144 с. Башта Т.М. Объёмные насосы и гидравлические приводы гидросистем. - М.: Машиностроение , 1974. - 607 с.

13. Гейер В.Г., Дулин В.С., Боруменский А.Г., Заря А.М. Гидравлика и гидропривод. - М.: Недра. 1981. - 295 с.

14. Коваль П.В. Гидравлика и гидропривод горных машин. - М. Машиностроение. 1979. - 319 с.

15. Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередач. (Под редакцией С.С. Руднёва и Л.Г. Подвидза). - М.: Машиностроение, 1974. - 416 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Елена Валентиновна Байдакова

Евгений Михайлович Байдаков

## **Гидравлика**

Методические указания

к выполнению лабораторных работ для студентов

очной и заочной форм обучения по направлению:

природообустройство и водопользование, землеустройство и кадастры

Редактор Павлютина И.П.

Подписано к печати 21.01.2012 Г. Формат 60x84 1/16.

Тираж 100 экз. Печ.л.2,96. Изд. №2281.

Брянская государственная сельскохозяйственная академия. 243365  
Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянская ГСХА.