

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Вологодская государственная
молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина»

Инженерный факультет

Кафедра энергетических средств и технического сервиса

ГИДРАВЛИКА

Часть 1. ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОМЕХАНИКА

Методические указания

по выполнению лабораторных работ
для студентов инженерного факультета
по направлению подготовки 35.03.06 – Агроинженерия

**Вологда – Молочное
2019**

УДК 621.22
ББК 30.123я73
Г46

Составитель –

канд. техн. наук, доцент кафедры энергетических средств
и технического сервиса

В.И. Баронов

Рецензенты:

канд. экон. наук, доцент кафедры энергетических средств
и технического сервиса

Н.И. Кузнецова,

канд. техн. наук, доцент кафедры технологического оборудования

Ю.В. Виноградова

Г46 **Гидравлика:** Методические указания / Сост. В.И. Баронов. – Вологда–Молочное: ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА, 2019. – 34 с.

Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Гидравлика» предназначены для студентов инженерного факультета по направлению подготовки 35.03.06 – Агроинженерия.

Печатается по решению редакционно-издательского совета ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА.

УДК 621.22
ББК 30.123я73

© Баронов В.И., 2019
© ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА, 2019

Введение

Выполнение описанных в указаниях лабораторных работ по гидравлике позволяет студентам глубже понять физическую сущность основных законов гидромеханики, получить реальное представление о возможностях гидромашин и гидроприводов для механизации и автоматизации производственных процессов и технологий в области избранной ими специальности, а также разобраться в принципах работы гидромашин и гидроприводов и освоить методы их испытаний в соответствии с требованиями государственных стандартов.

Компьютерная версия лаборатории гидромеханики, гидравлических машин и гидроприводов позволяет имитировать работу гидравлических машин в различных режимах, выполнять измерения параметров их работы таких как напор (давление), подача (расход), крутящий момент, число оборотов, мощность и др.

Измерение указанных параметров осуществляется на стенде измерительных приборов куда поступает информация непосредственно с модели лабораторного стенда.

При этом программа генерирует случайные отклонения измеряемых величин в интервалах наблюдаемых при испытании реальных гидромашин.

Лабораторная работа 1

ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЗАКОНА ПАСКАЛЯ

Теоретические основы. Гидростатическим давлением p называют нормальное сжимающее напряжение, возникающее в покоящейся жидкости под действием поверхностных и массовых сил:

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

где ΔP – элементарная равнодействующая поверхностных и массовых сил (гидростатическая сила), Н;

ΔS – элементарная площадка действия, m^2 .

Из формулы (1.1) видно, что гидростатическое давление p есть предел отношения элементарной гидростатической силы ΔP к элементарной площади действия ΔS , когда последняя стремится к нулю.

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

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

$$P_{абс} = P_{ат} + P_{изб}, \quad (1.2)$$

Очевидно,

$$P_{изб} = P_{абс} - P_{ат}. \quad (1.3)$$

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

Из формулы (1.3) 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, 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:

$$p_{изб} = \rho g h_{p_{изб}}, \quad (1.4)$$

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

$h_{p_{изб}}$ – пьезометрическая высота, т.е. высота, отсчитываемая от точки подключения пьезометра до уровня жидкости в нем.

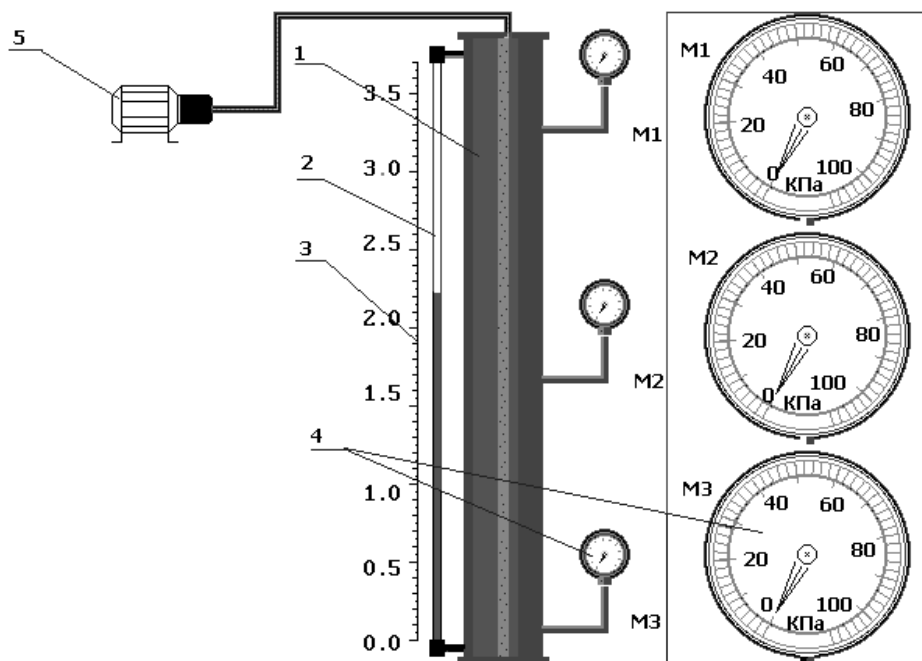
Действие механических приборов основано на деформации под действием давления упругого элемента (пружины или мембраны). Заметим, что пружинный манометр показывает давление в точке жидкости на уровне оси вращения его стрелки. Если высотное положение оси вращения стрелки и точки подключения манометра не совпадает (рис. 1.1), в показание манометра p_m вводят поправку ($\pm \rho g y$).

Для случая, изображенного на рис. 1.1,

$$p_{изб} = p_m + \rho g y, \quad (1.5)$$

где y – превышение оси вращения стрелки манометра над точкой его подключения, м.

В данной лабораторной работе предусмотрено измерение манометрического давления пружинными манометрами.



Р и с. 1.1. Схема установки для экспериментального подтверждения закона Паскаля: 1 – металлическая колонна; 2 – водомерная стеклянная трубка; 3 – мерная шкала в метрах; 4 – механический манометр; 5 – воздушный компрессор

Когда на покоящуюся жидкость действует только сила тяжести, распределение гидростатического давления p по глубине h (рис. 1.2) описывается основным уравнением гидростатики:

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (1.6)$$

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;

ρgh – весовое давление, т.е. гидростатическое давление, создаваемое весом столба h жидкости, Па.

Из уравнения (1.6) видно, что при $p_0 = const$ и $\rho g = const$ давление p с изменением величины h изменяется по линейному закону (рис. 1.2). Вычислив по уравнению давление p в двух точках, заглубленных на разную величину h , можно построить диаграмму распределения гидростатического давления по глубине, называемую эпюрой гидростатического давления (рис. 1.2).

Из уравнения (1.6) следует, что внешнее давление p_0 в покоящейся жидкости передается во все точки ее объема без изменения (рис. 1.2).

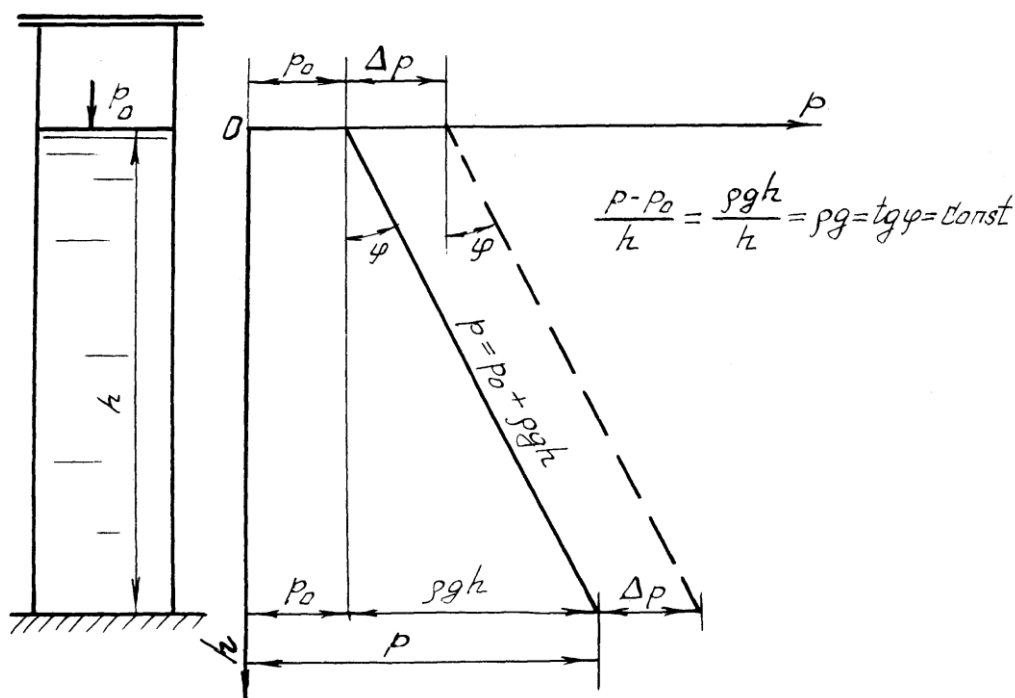
Это следствие, вытекающее из уравнения (1.6), называют законом Паскаля. Справедливость этого закона предстоит проверить опытным путем в данной работе.

Цели работы:

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

Описание установки. Установка (рис. 1.1) 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, заглубленных под уровень соответственно на h_B и h_C , подключены пружинные манометры M_A , M_B , M_C .



Р и с. 1.2. К закону Паскаля и его экспериментальному подтверждению

Описание установки. Установка (рис. 1.1) представляет собой толстостенный стальной цилиндр 1, частично заполненный водой, уровень которой измеряется водомерной трубкой 2 со шкалой 3.

Для изменения гидростатического давления над свободной поверхностью жидкости (в т. А) и в точках В и С, заглубленных 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 5.

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, для обеспечения $p_{0_{изб}} = 0$, далее измерить с помощью водомерной трубки 2 и шкалы 3 глубины погружения h_B и h_C точек В и С, а также превышения y_B и y_C осей вращения стрелок манометров M_B и M_C над точками их подключения. Затем измерить показания всех трех манометров (M_A , M_B , M_C).

Опыт №2. Включить компрессор для подачи сжатого воздуха в цилиндр 1. Довести $p_{0_{изб}}$ до величины, указанной преподавателем, после чего компрессор отключить. Далее измерить одновременно показания манометров

метров M_A, M_B, M_C . Открыть вентиль для сброса давления сжатого воздуха.

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

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 чем 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?

Лабораторная работа 2

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

Теоретические основы. Для двух произвольно выбранных живых сечений I-I и II-II струйки реальной жидкости (рис. 2.1) при установившемся движении уравнение Д. Бернулли имеет вид:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + h'_{w1-2}, \quad (2.1)$$

где Z – геометрическая высота (напор), т.е. превышение центра тяжести рассматриваемого поперечного сечения струйки над плоскостью сравнения 0-0, выбираемой произвольно (рис. 2.1);

$p/\rho g$ – 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;

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

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

струи;

$h_{w1-2}^{\wedge} = H_1 - H_2$ – 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 (2.1) 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}^{\wedge} – потеря полной удельной энергии струйки, т.е. часть ее, затраченная на преодоление работы сил внутреннего трения, обусловленного вязкостью жидкости.

Слагаемые, входящие в уравнение (2.1), можно истолковать с геометрической и энергетической точек зрения.

С геометрической точки зрения, слагаемые уравнения (2.1) являются высотами (напорами).

Удельной энергией называется энергия, приходящаяся на единицу веса жидкости.

Величины слагаемых уравнения (2.1) 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. 2.2);

h_{w1-2}^{\wedge} – по разности отметок уровней воды в скоростных трубках, подключенных к сечениям I-I и II-II (рис. 2.2).

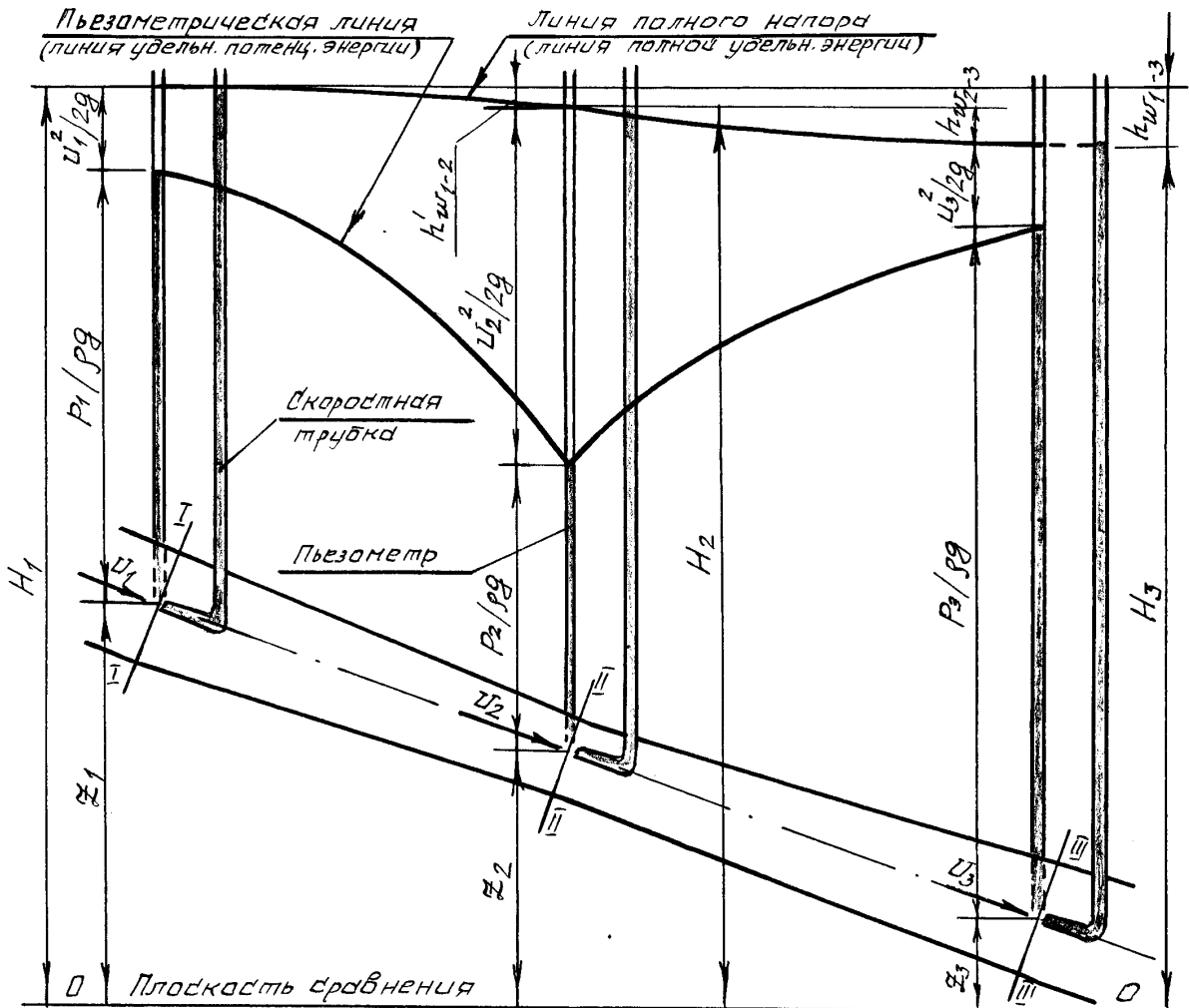


Рис.2.1. Диаграмма уравнения Д.Бернулли для струйки реальной жидкости

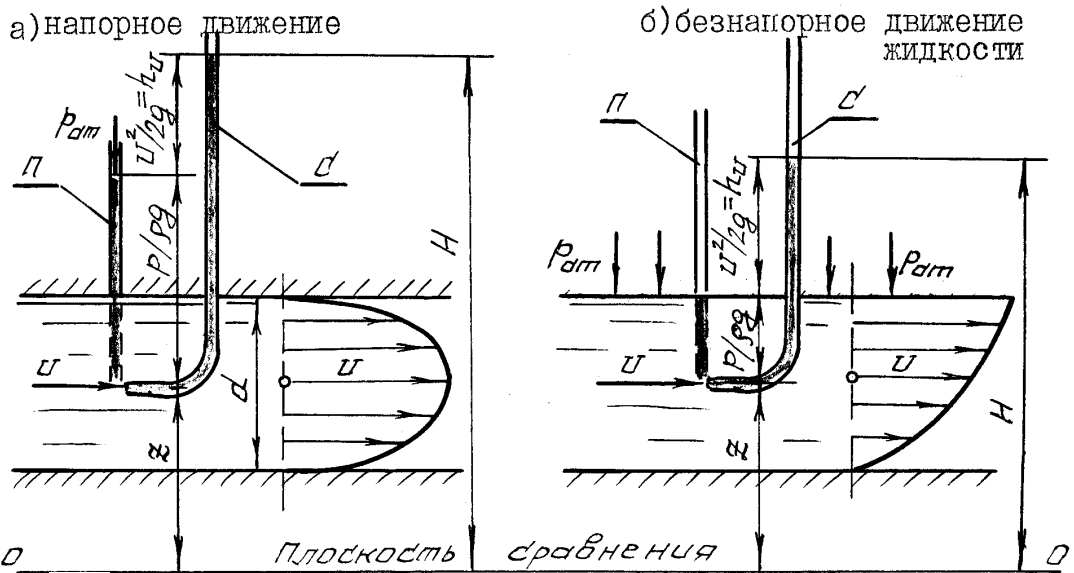


Рис.2.2. К измерению скоростного напора $u^2/2g$

Скоростная трубка (рис. 2.2) представляет собой трубку, верхний конец которой открыт в атмосферу, а нижний изогнут навстречу скорости U 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 (рис. 2.2), 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:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} + h_{w1-2}, \quad (2.2)$$

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, ω – 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;

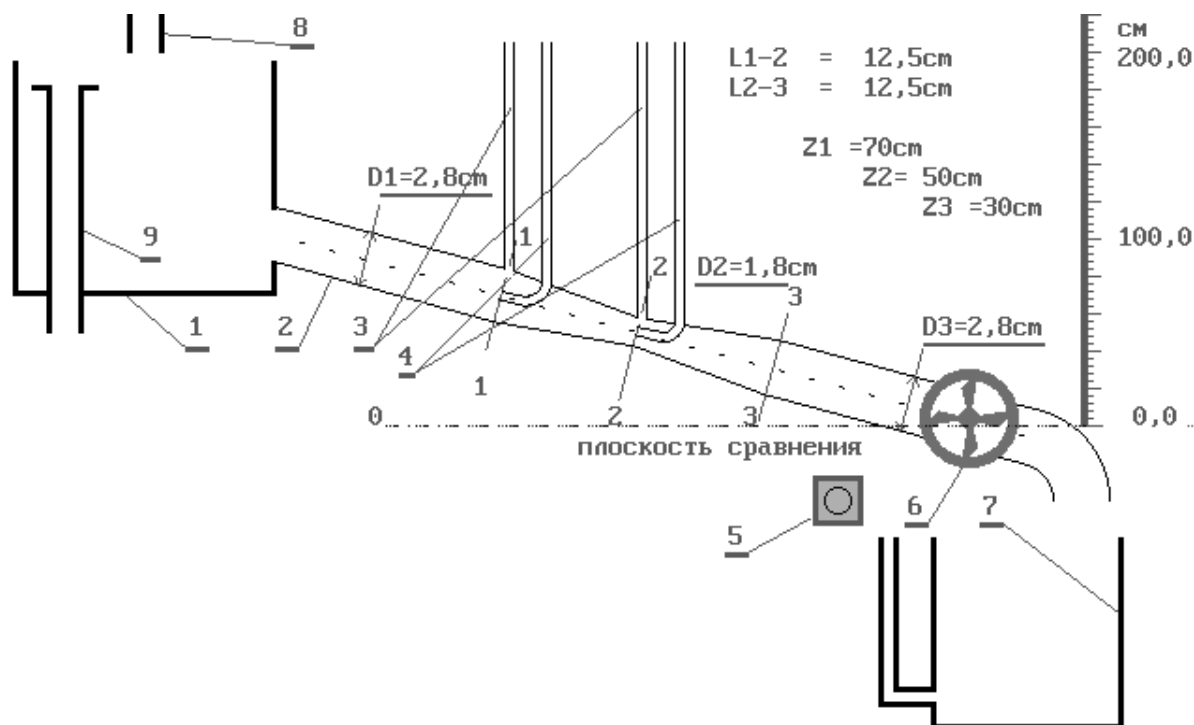
α – коэффициент Кориолиса (корректив кинетической энергии), учитывающий неравномерность распределения местных скоростей U по живому сечению потока, обусловленную вязкостью жидкости.

Величина α 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 (2.1) и (2.2) в различных живых сечениях можно изображать графически в виде диаграммы уравнения Д. Бернулли (графика напоров), дающей наглядное представление о перераспределении по пути движения жидкости потенциальной и кинетической энергии, а также о характере убывания полной энергии.

Цели 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 (рис. 2.1).
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 (рис. 2.1).



Р и с. 2.3. Схема экспериментальной установки для определений слагаемых уравнения Бернулли:

1 – напорный питающий бак; 2 – трубопровод переменного сечения; 3 – пьезометры; 4 – скоростные трубки; 5 – секундомер; 6 – вентиль для регулирования расхода воды; 7 – мерный бак; 8 – питающий трубопровод; 9 – переливное устройство

Описание установки. Установка (рис. 2.3) представляют собой трубопровод 2 переменного сечения с напорным баком 1, вода в который подается по питающему трубопроводу 8. Бак 1 снабжен переливным устройством 9 для поддержания уровня воды на постоянной отметке, чтобы обеспечить в трубопроводе 2 установившееся движение жидкости.

К сечениям I-I...II-II трубопровода 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 6. Для измерения расхода воды имеются мерный бак 7 и секундомер 5.

Порядок выполнения работы и обработка опытных данных

1. При закрытом вентиле b заполнить бак 1 и трубопровод 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 b так, чтобы трубопровод 2 работал полным сечением, а уровень воды в баке постоянным.
3. Измерить с помощью бака 7 и секундомера 5 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. Затем выполнить все вычисления и построить в масштабе по полученным данным линии полного напора и пьезометрическую, так, как показано на рис. 2.1.
5. Дать заключение по результатам работы.

Контрольные вопросы:

1. Поясните энергетический смысл слагаемых уравнения Д. Бернулли.
2. Как называется коэффициент α , входящий в уравнение Д. Бернулли для потока реальной жидкости, что он учитывает и от чего зависит его величина?
3. Объясните, чем 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?
6. Поясните, что такое скоростная трубка и трубка Пито?
7. Поясните, что такое линия полного напора и пьезометрическая линия, что будут представлять собой эти линии при равномерном движении реальной жидкости?
8. Что понимают под термином «живое сечение потока жидкости»?

Лабораторная работа 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИЛЛЮСТРАЦИЯ ЛАМИНАРНОГО И ТУРБУЛЕНТНОГО РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ И КРИТИЧЕСКОГО ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА

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

Ламинарный режим наблюдается при небольших скоростях движе-

ния. 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 μ , и плотностью, а также от диаметра трубопровода d . Одновременно опытами установлено, что величина безразмерного алгебраического комплекса, отвечающей критической скорости $v_{кр}$, от μ , ρ и d не зависит.

$$Re_{кр(d)} = \frac{v_{кр} d \rho}{\mu} = \frac{v_{кр} d}{\nu} \approx 2320 = const \quad (3.1)$$

где $v_{кр}$ – критическая скорость потока жидкости, м/с;

d – диаметр трубопровода, м;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

μ – динамическая вязкость, Па·с;

ν – кинематическая вязкость, м²/с;

$Re_{кр(d)}=2320$ – критическое число 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

$$Re_{(d)} = \frac{vd}{\nu} \quad (3.2)$$

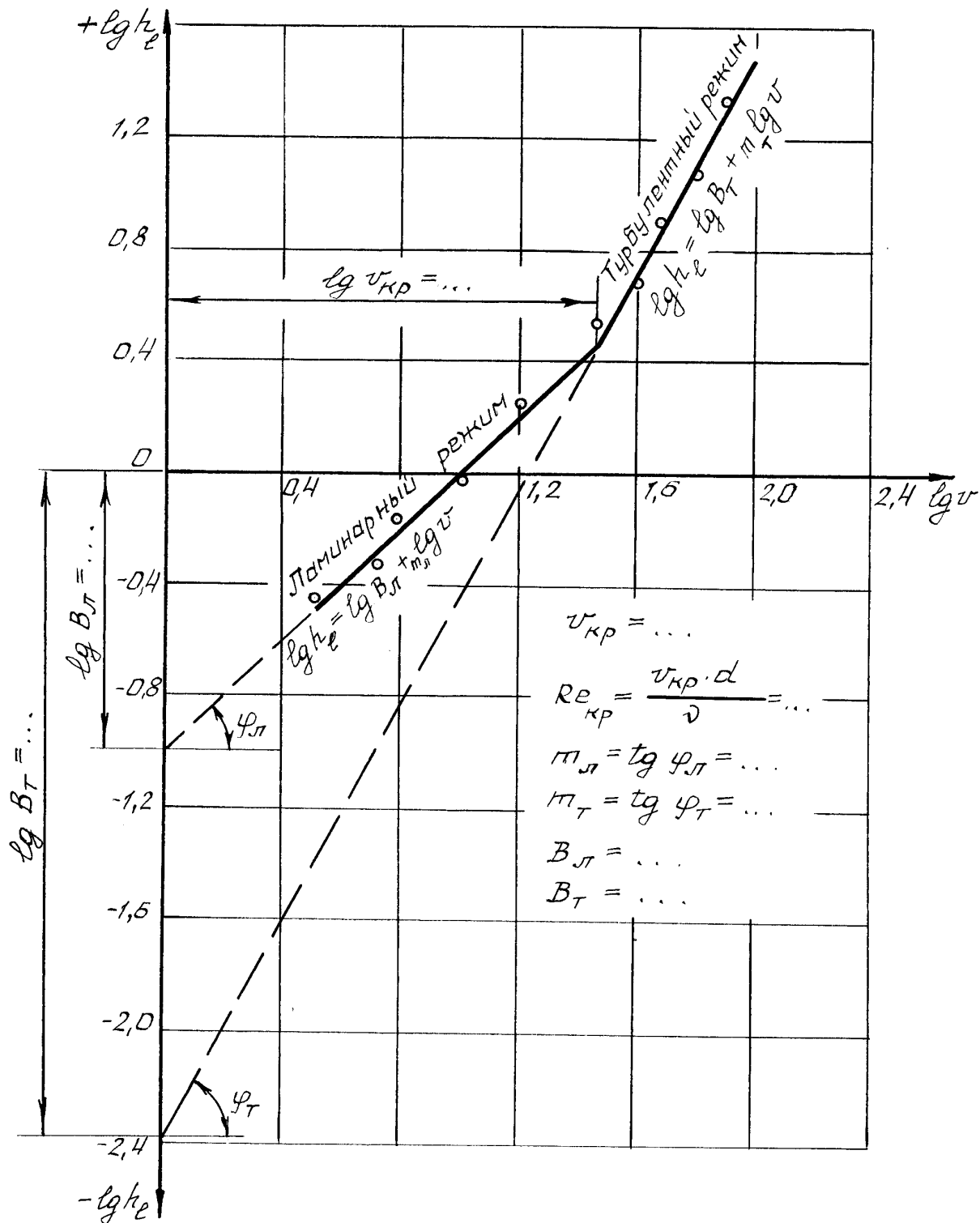
является критерием, позволяющим судить о режиме движения жидкости в круглой трубе, работающей полным сечением.

Величину $\nu=\mu/\rho$, входящую в формулу (3.1) и (3.2), называют кинематическим коэффициентом вязкости жидкости.

Из изложенного следует, что для определения режима движения жидкости в круглом трубопроводе при напорном движении достаточно вычислить по формуле (3.2) 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. 3.1 в виде графика зависимости потерь напора по длине h_e от средней скорости v) при ламинарном режиме потери напора h_e пропорциональны средней скорости v в первой

степени, а при турбулентном – в степени $1,75 < m > 2,0$. Заметим, что с помощью этого графика определяют величину критической скорости $U_{кр}$, а через нее – и критическое число Рейнольдса по формуле (3.1).



Р и с. 3.1. График зависимости потерь напора по длине h_l от средней скорости v в логарифмической форме

Цели 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 $Re < Re_{кр}$, а при турбулентном – $Re > Re_{кр}$.
3. Построить по опытным данным, полученным на винипластовой трубе, график $lgh_e = f(\lg U)$, определить с его помощью критическую скорость $U_{кр}$, а через нее вычислить критическое число $Re_{кр} = 2320$.
4. Подтвердить с помощью графика $lgh_e = f(\lg U)$, что при ламинарном режиме потери напора по длине h_e пропорциональны средней скорости в первой степени, а при турбулентном – в степени $1,75 \leq m \leq 2$.

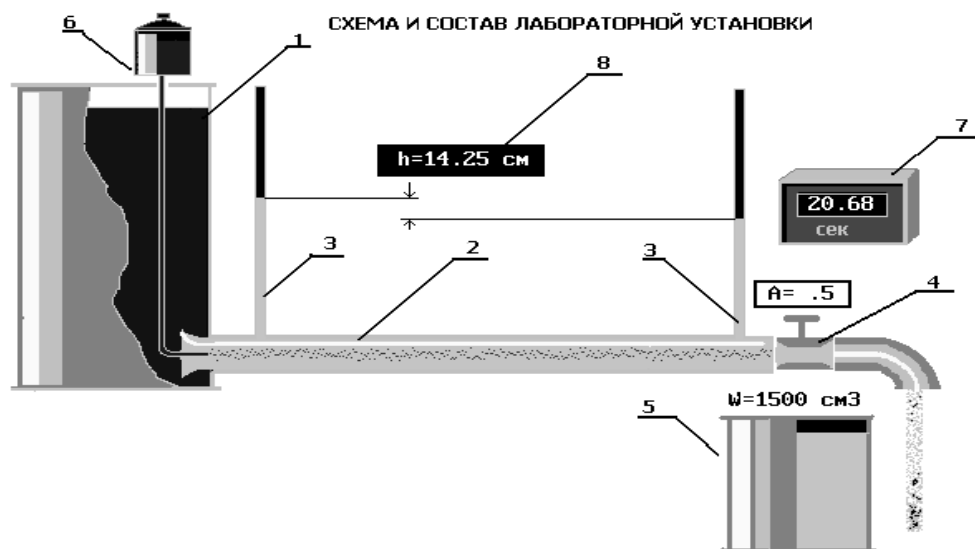
Описание установки. Установка (рис. 3.2) включает в себя две расположенные горизонтально трубы: стеклянную 2 ($d=1,6$ см) и винипластовую ($d=0,9$ см), расположенную внутри стеклянной, в которых и изучается движение воды при различных режимах, напорный бак 1, емкость 6 с раствором красителя, подаваемого открытием краника по трубке во входное сечение трубы 2. Для измерения расхода воды в трубах служат мерный бак 5 и секундомер 7. Регулирование расхода воды и средней скорости ее движения в трубах, осуществляется краном 4. На трубе 2 имеются пьезометры 3 для определения потерь напора по длине h_e (по разности их показаний).

Порядок выполнения работ и обработка опытных данных

1. Открыть вентиль и наполнить водой бак 1 настолько, чтобы переливное устройство начало работать.
2. Открыть незначительно кран 4 на стеклянной трубе 2, чтобы скорость движения воды в ней была небольшой (вода из трубы 2 должна течь тонкой струйкой).
3. Подать из емкости 6 в трубу 2 небольшое количество раствора красителя, чтобы окрашенная струйка воды представляла собой отчетливо выраженную нить по всей длине трубы.
4. Измерить с помощью мерного сосуда 5 и секундомера 7 расход воды Q в трубе. При этом измеряемый объем воды в сосуде 5 должен быть также, чтобы время наполнения составляло не менее 20...30 секунд.
5. Записать результаты измерений.
6. Увеличить открытием крана 4 скорость движения воды в трубе 2, 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.

7. Дальнейшим увеличением открытия крана 4 создать в трубе 2 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.
8. Установить подачу жидкости с красителем на винипластовой трубе так, чтобы разность показаний пьезометров 8 составляла не более 0,3 см, и измерить расход воды.
9. Сделать еще девять аналогичных опытов, увеличивая подачу жидкости с красителем в каждом последующем опыте так, чтобы разность показаний пьезометров 3 (потеря напора по длине h_e) при этом возрастала примерно в 1,5...1,6 раза.
10. Выполнить все необходимые вычисления.
11. Построить в масштабе график $\lg h_e = f(\lg v)$ (рис. 3.1) и определить с его помощью критическую скорость $v_{кр}$, а через нее 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 .
12. Дать заключение по результатам работы.



Р и с. 3.2. Схема экспериментальной установки для определения режима движения жидкости:

- 1 – напорный бак; 2 – стеклянная прозрачная труба; 3 – пьезометры; 4 – регулирующий кран; 5 – мерный бак; 6 – емкость с раствором красителя; 7 – секундомер; 8 – индикация разности уровней в пьезометрах (гидравлических потерь)

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.

Лабораторная работа 4

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НАПОРНОГО ТРУБОПРОВОДА С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ И МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Теоретическая 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:

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

где λ – безразмерный коэффициент, называемый коэффициентом гидравлического трения (коэффициентом Дарси).

Величина коэффициента λ характеризует гидравлическое сопротивление трубопровода и зависит в общем случае от числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости Δ_s/d трубопровода, т.е. $\lambda=f(Re, \Delta_s/d)$;

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

v – средняя скорость движения потока жидкости, м/с.

Величину коэффициента λ при гидравлических экспериментах вычисляют по опытным данным из формулы (4.1).

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 докватричного сопротивления – по формуле А.Д. Альтшуля:

$$\lambda_{доке.} = 0,11\left(\frac{\Delta_э}{d} + \frac{68}{Re}\right)^{0,25} \quad (4.2)$$

Величину абсолютной эквивалентной шероховатости $\Delta_э$ при расчетах берут из справочной литературы в зависимости от материала трубопровода и состояния его внутренней поверхности.

Например, для труб из органического стекла $\Delta_э=0,006$ мм, а для стальных водопроводных умеренно заржавленных труб $\Delta_э=0,20\dots0,50$ мм.

Область гидравлического сопротивления при расчетах определяют или непосредственно по графикам $\lambda=f(Re, \Delta_э/d)$, полученным опытным путем для труб из различных материалов и приведенным в справочной литературе, например, по графику Никурадзе (рис. 4.1), или же с помощью соотношений $\frac{10d}{\Delta_э}$ и $\frac{500d}{\Delta_э}$, предложенных А.Д. Альтшулем на основе использования упомянутых графиков.

В последнем случае поступают следующим образом.

Вычисляют соотношения $10d/\Delta_э$ и $500d/\Delta_э$ и сравнивают их с числом Рейнольдса $Re = \rho d/v$. При этом, если $Re \geq \frac{500d_э}{\Delta_э}$, трубопровод работает в области гидравлически гладких труб. Если $Re \leq \frac{10d}{\Delta_э}$, трубопровод работает в области квадратичного сопротивления.

Если же $10d/\Delta_э < Re < 500d_э/\Delta_э$, трубопровод работает в области докватричного сопротивления.

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

Другой вид гидравлических сопротивлений, возникающих в местах резкого изменения конфигурации потока, называют местными сопротивлениями, а вызываемые ими потери напора – местными потерями напора (h_m).

При прохождении через любое местное сопротивление поток жидкости деформируется (рис. 4.2, а, б), вследствие чего движение становится неравномерным резко изменяющимся, для которого характерны:

- 1) значительное искривление линий потока и кривых сечений потока;
- 2) отрывы транзитной струи от стенок трубопровода (ввиду действия закона инерции) и возникновения в местах отрыва устойчивых во-

- довязатов;
- 3) повышенная (по сравнению с равномерным движением) пульсация скоростей и давлений;
 - 4) изменение формы (переформирование) эпюр скоростей.

Местные потери напора при гидравлических расчетах вычисляются по формуле Вейсбаха:

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (4.3)$$

где ζ – 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 ζ зависит в общем случае от числа Рейнольдса Re 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 ζ от Re не зависит.

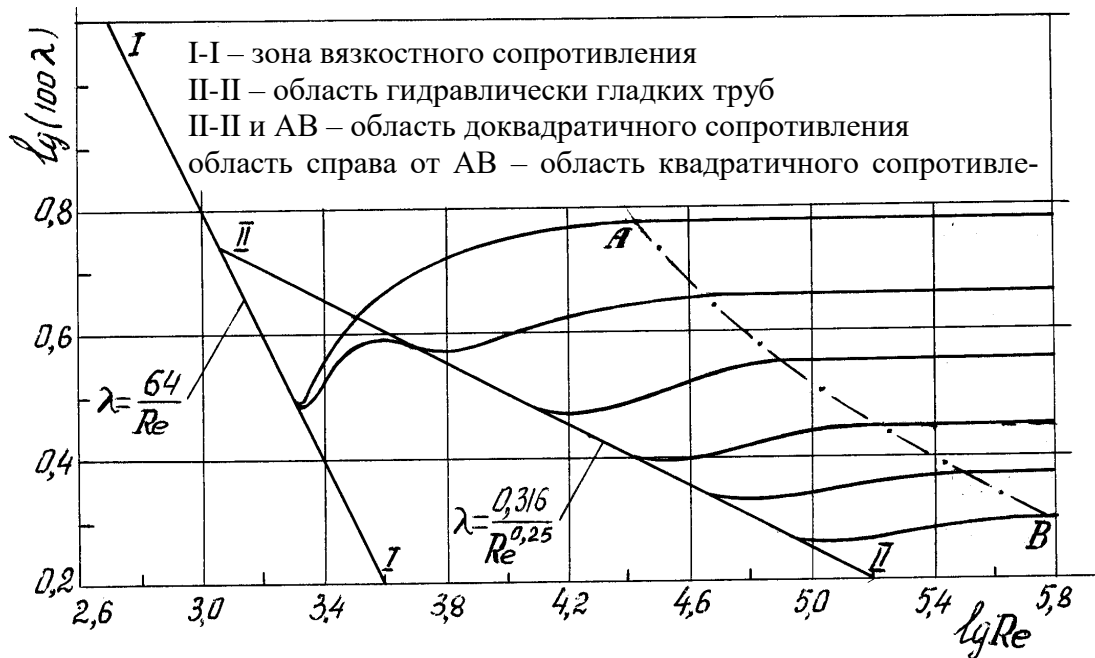
Величину ζ для каждого вида местного сопротивления определяют по данным гидравлических экспериментов, пользуясь формулой (4.3), полученные таким образом значения коэффициентов ζ для различных видов местных сопротивлений (обычно при квадратичной области сопротивления) приводятся в справочной и специальной литературе, откуда и берутся при гидравлических расчетах.

Исключением является резкое расширение и резкое сужение трубопровода (см. рис. 4.2, а, б), для которых численные значения коэффициента ζ определяются по формулам, полученным теоретически.

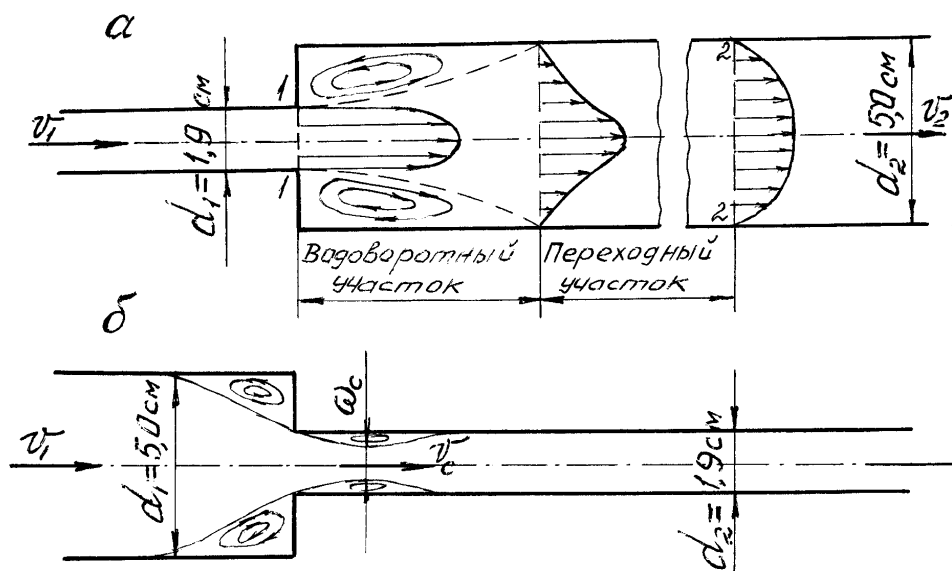
Так, при резком расширении трубопровода, когда средняя скорость в формуле (4.3) взята перед местным сопротивлением, т.е. v_1 ,

$$\zeta'_{pp} = (1 - \omega_1/\omega_2)^2, \quad (4.4)$$

если же скорость берется за местным сопротивлением, т.е. v_2 ,



Р и с. 4.1. График зависимости коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса Re для труб с различной относительной шероховатостью Δ/d (график Никурадзе)



Р и с. 4.2. Схемы движения жидкости при резком (внезапном) изменении сечения трубопровода:
 а – резкое расширение трубопровода; б – резкое сужение трубопровода

$$\zeta''_{pp} = (\omega_2 / \omega_1 - 1)^2. \quad (4.5)$$

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

При этом

$$\zeta_{p.c.} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)^2, \quad (4.6)$$

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

Цели работы:

1. Определить по опытным данным, воспользовавшись формулами (4.1) и (4.3), значение коэффициента гидравлического трения λ_{on} и величины коэффициента ζ для трех видов местных сопротивлений.
2. Установить, воспользовавшись соотношениями А.Н. Альтшуля или же графиком Никурадзе (рис. 4.1), области гидравлического сопротивления, в которых работали участки напорного трубопровода.
3. Вычислить значения коэффициентов гидравлического трения λ по соответствующим эмпирическим формулам.
4. Оценить сходимость λ_{on} и ζ_{on} с их расчетными справочными значениями.

Описание установки. Установка (рис. 4.3) 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. Для регулирования расхода воды Q в системе служит вентиль 2. Величина Q измеряется с помощью мерного бака 1 и секундомера 3. Подача воды в систему осуществляется из питающего бака 5.

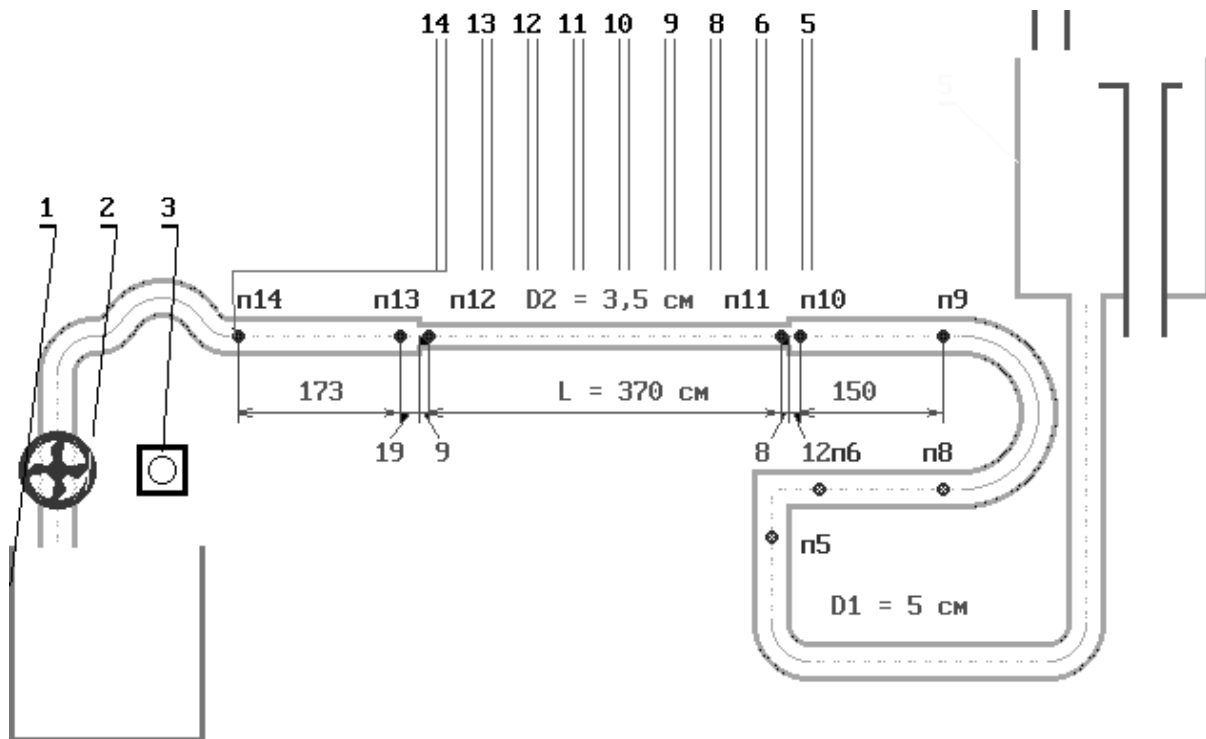
Постоянный уровень воды в баке 5 (для обеспечения установившегося движения в системе) поддерживается переливным устройством. Вода в бак 5 подается центробежным насосом.

Порядок выполнения работы и обработка опытных данных

При закрытом вентиле 2 и задвижке включить насос и обеспечить подачу воды в питающий бак 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 также ее температуру (термометром в баке 1).

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



Все размеры даны в сантиметрах

Р и с. 4.3. Схема экспериментальной установки для определения коэффициентов гидравлического трения и местных сопротивлений:

1 – мерный бак; 2 – вентиль для регулирования расхода воды; 3 – секундомер; 4 – пьезометры; 5 – напорный питающий бак; D1, D2 – диаметры трубопроводов

Контрольные вопросы:

1. Напишите и поясните формулы Дарси – Вейсбаха и Вейсбаха.
2. Поясните, как опытным путем определяют величины коэффициентов λ и ξ .
3. Что характеризуют коэффициенты λ и ξ , от каких факторов в общем случае они зависят и как их определяют при гидравлических расчетах?
4. Объясните, что такое Δ_s и Δ_s/d , как найти величину Δ_s при гидравлических расчетах?
5. Назовите области гидравлического сопротивления трубопроводов и объясните, как определяют область сопротивления при гидравлических расчетах.

Лабораторная работа 5

ИЗУЧЕНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ МАЛЫЕ ОТВЕРСТИЯ В ТОНКОЙ СТЕНКЕ И НАСАДКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ В АТМОСФЕРЕ

Теоретическая часть. Малым считаются отверстие, высота которого не превышает $0,1 H$. Здесь H – превышение свободной поверхности жидкости над центром тяжести отверстия.

Стенку считают тонкой, если ее толщина $\delta < (1,5 \dots 3,0)d$ (где d – внутренний диаметр трубопровода).

При выполнении этого условия величина δ 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 на расстоянии примерно $(0,5 \dots 1,0)d$ от входной кромки отверстия. Это сечение называют сжатым. Степень сжатия струи в этом сечении оценивают коэффициентом сжатия ε :

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}, \quad (5.1)$$

где ω_c и ω – площадь сжатого живого сечения струи и площадь отверстия, соответственно.

Среднюю скорость струи V_c в сжатом сечении при $p_0 = p_{am}$ вычисляют по формуле, полученной из уравнения Д. Бернулли:

$$V_c = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (5.2)$$

где φ – коэффициент скорости отверстия;

H – превышение свободной поверхности жидкости над центром тяжести отверстия, м.

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}}, \quad (5.3)$$

где α – коэффициент Кориолиса;

ζ – коэффициент сопротивления отверстия,

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

$$\varphi = \frac{x_i}{2\sqrt{y_i H}}, \quad (5.4)$$

где 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:

$$Q = V_c \omega_c = \varphi \sqrt{2gH} \varepsilon \omega = \varphi \varepsilon \omega \sqrt{2gH}, \quad (5.5)$$

$$\varphi \varepsilon = \mu, \quad (5.6)$$

где μ – коэффициент расхода отверстия, учитывающий влияние гидравлического сопротивления и сжатия струи на расход жидкости.

С учетом выражения для μ формула (5.5) принимает вид:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}. \quad (5.7)$$

Величины коэффициентов ε , ζ , φ , μ 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 $2,5d \leq L_H \leq 5d$, 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 насадки в области сжатого сечения и обуславливающему повышение напора истечения.

Среднюю скорость истечения жидкости из насадки V и расход Q определяют по формулам, полученным из уравнения Д. Бернулли:

$$V = \varphi_H \sqrt{2gH}, \quad (5.8)$$

где $\varphi_H = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_H}}$ – коэффициент скорости насадки;

ζ_H – коэффициент сопротивления насадки.

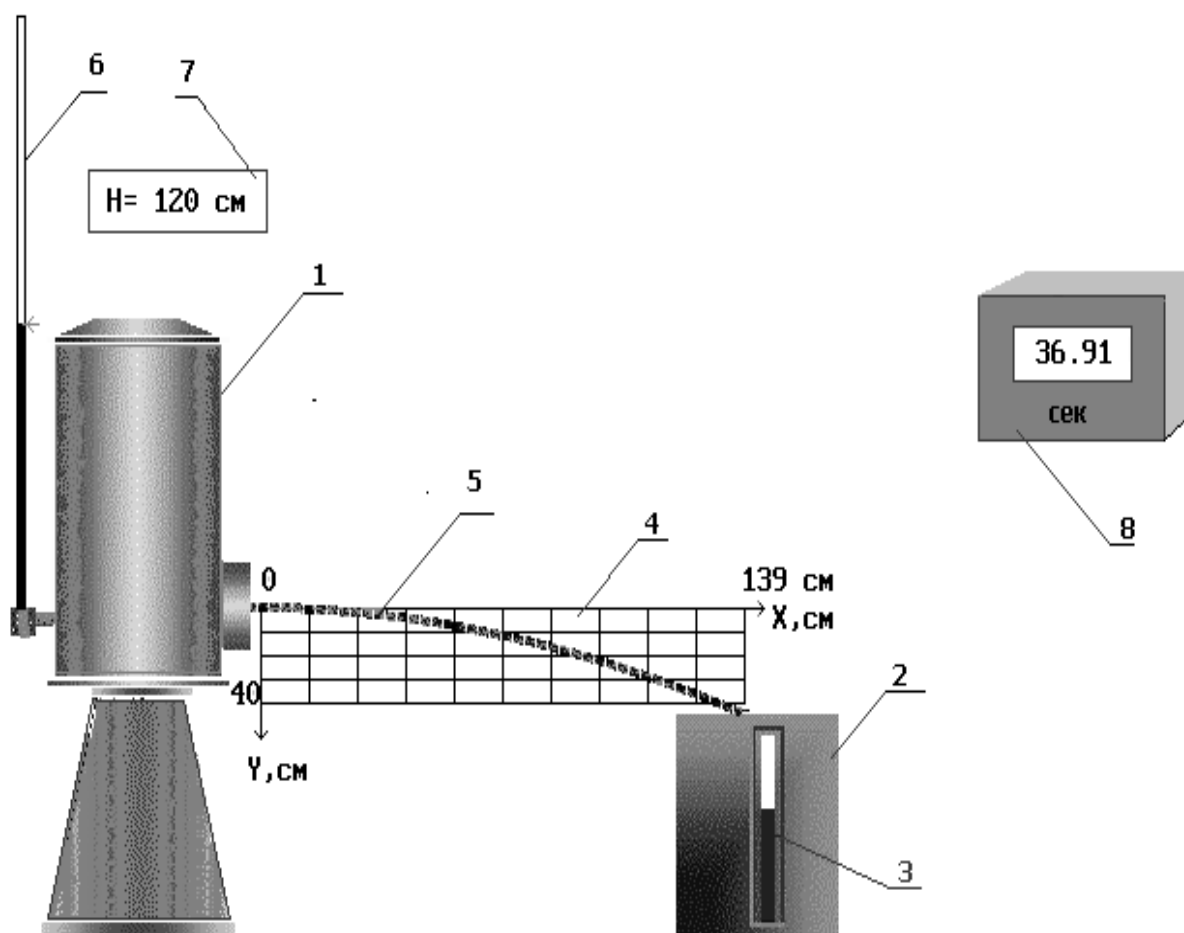
Для выходного сечения в-в коэффициент сжатия струи $\varepsilon = 1$ (насадка в этой области работает полным сечением), поэтому коэффициент расхода насадки $\mu_H = \varphi_H$.

Расход жидкости, вытекающий из насадки, вычисляется по формуле:

$$Q = \mu_H \omega \sqrt{2gH}. \quad (5.9)$$

Цели 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) насадок при $H = \text{const}$ в атмосферу.
2. Сравнить значения коэффициентов, полученные в опытах, со справочными и подсчитать относительные отклонения.



Р и с. 5.1. Схема лабораторной установки:

1 – напорный резервуар; 2 – мерный бак; 3 – водомерное стекло; 4 – координатный планшет (щит); 5 – струя истечения жидкости; 6 – пьезометр; 7 – напор истечения; 8 – секундомер

Описание установки. Установка (рис. 5.1) представляет собой напорный резервуар 1, в боковой поверхности которого имеется отверстие, закрываемое рычажным клапаном.

Перед отверстием (снаружи резервуара I) смонтирован поворотный круг с отверстиями различной формы и насадками различных типов. Поворачивая круг, можно установить против отверстия насадку нужного типа или отверстие требуемой формы. Вода в резервуаре I подается по трубопроводу открытием задвижки. Постоянный уровень воды в резервуаре I во время опытов поддерживается переливной трубой, а ослабление возмущений, создаваемых поступающей в него водой, осуществляется успокоительной решеткой.

Для определения напора истечения H резервуар I снабжен пьезометром $б$ со шкалой, нуль которой совмещен с центром отверстия.

Расход воды при истечении из отверстий и насадок измеряется с помощью передвижного мерного бака 2 и секундомера 8 . Для опорожнения мерного бака имеется вентиль.

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, заполнить водой резервуар I настолько, чтобы работала переливная труба.
2. Поворотом круга установить перед отверстием круглое отверстие диаметром $d=2$ см и закрепить круг в этом положении.
3. Открыть клапан и обеспечить с помощью задвижки 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 2 и секундомера 8 (измеряемый объем воды должен быть не менее 50 литров).
5. Закрыть клапаном отверстие и опорожнить мерный бак 2 .
6. Устанавливая с помощью поворотного круга против отверстия 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).
7. Обработать опытные данные, выполнив все вычисления.
8. Дать заключение по результатам работы.

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.

Лабораторная работа 6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРЯМОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Теоретическая 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. 6.1).

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 C .

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.

Далее 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 Δp при прямом гидравлическом ударе Н.Е. Жуковским в 1898 г. предложена формула:

$$\Delta p = \rho C v, \quad (6.1)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

C – скорость распространения ударной волны, м/с;

v – средняя скорость движения жидкости в трубопроводе до закрытия затвора (при установившемся движении), м/с.

Величину C вычисляют по формуле:

$$C = \frac{\sqrt{E_{жс}}}{\sqrt{1 + \frac{E_{жс} d}{E_{тр} \delta}}}, \quad (6.2)$$

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

$E_{жс}$ 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, м;

δ – толщина стенки трубопровода, м.

Цель работы. Определить опытным путем величину повышения давления $\Delta p_{оп}$ при прямом гидравлическом ударе в напорном трубопроводе, сравнить ее с величиной Δp , вычисленной по формуле Н. Е. Жуковского (см. формулу 6.1), и подсчитать относительное отклонение.

Описание установки. Установка (рис. 6.1) состоит из горизонтального стального трубопровода 3, присоединенного к напорному резервуару 1, в котором уровень воды во время опытов поддерживается на постоянной отметке с помощью переливного устройства 2.

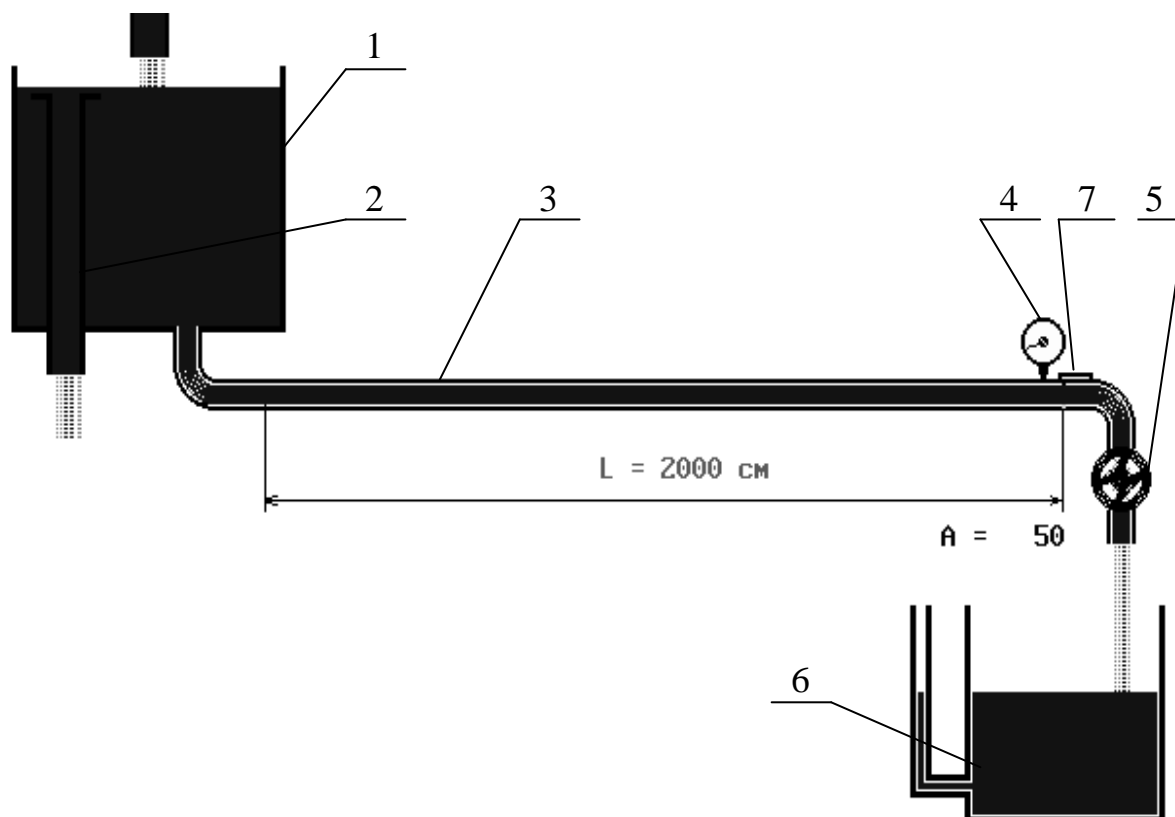
В конце трубопровода 3 имеется вентиль 5 для регулирования скорости движения воды в нем, клапанный затвор 7, позволяющий практически

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 6 снабженный водомерной трубкой со шкалой.

Порядок выполнения работы и обработка опытных данных

1. Измерить по манометру 4 давление в трубопроводе 3 до удара (при закрытом вентиле 5).
2. Открыть (не полностью) вентиль 5, обеспечить пропуск по трубопроводу 3 некоторого расхода воды.
3. Измерить расход воды Q с помощью мерного бака 6 и секундомера. При этом измеряемый объем воды должен быть не менее 50 литров.
4. Перекрыть затвором 7 трубопровод 3 и измерить по манометру 4 величину максимального давления при ударе.
5. Сделать еще два аналогичных опыта при других расходах воды.
6. Обработать опытные данные и дать заключение по результатам работы.



Р и с. 6.1. Схема экспериментальной установки
для изучения прямого гидравлического удара
в напорном трубопроводе:

1 – напорный резервуар; 2 – переливное устройство; 3 – трубопровод; 4 – манометр;
5 – вентиль; 6 – мерный бак; 7 – клапанный затвор

Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте понятие 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. Жуковского для определения повышения давления при ударе.
6. Напишите и поясните формулу для определения скорости распространения ударной волны.

Список литературы

1. Брюханов, О.Н. Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики [Текст]: учебник / О.Н. Брюханов, В.И. Коробко, А.Т. Мелик-Аракелян.– М.: Инфра-М, 2019.– 254 с.
2. Викулин, П.Д. Гидравлика систем водоснабжения и водоотведения [Электронный ресурс]: учебник / П.Д. Викулин, В.Б. Викулина. – 2-е изд., (эл.).– М.: МИСИ–МГСУ, 2017. – 249 с. – Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/969162>
3. Гиргидов, А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) [Электронный ресурс]: учебник / А.Д. Гиргидов.– 2-е изд., испр. и доп.– М.: ИНФРА-М, 2018. – 704 с.– Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/926430>
4. Гусев, А.А. Гидравлика [Текст]: учебник для студентов высших учебных заведений по техническим направлениям и специальностям: базовый курс / А.А. Гусев.– М.: Юрайт, 2014. – 285 с.
5. Исаев, А.П. Гидравлика [Текст]: учебник / А.П. Исаев, Н.Г. Кожевникова, А.В. Ещин.– М.: Инфра-М, 2019. – 420 с.
6. Зуйков, А.Л. Гидравлика: в 2 т. – Т. 1. Основы механики жидкости [Электронный ресурс]: учебник / А.Л. Зуйков. – 2-е изд., (эл.).– М.: МИСИ–МГСУ, 2017.– 519 с. – Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/969478>
7. Кожевникова, Н.Г. Практикум по гидравлике [Текст]: учебное пособие / Н.Г. Кожевникова и др.– М.: ИНФРА-М, 2014.– 248 с.
8. Лепешкин, А.В. Гидравлика и гидропневмопривод. Гидравлические машины и гидропневмопривод [Текст]: учебник / А.В. Лепешкин, А.А. Михайлин, А.А. Шейпак.– 6-е изд., перераб. и доп.– М.: Инфра-М, 2019.– 446 с.
9. Малый, В.П. Практикум по гидравлике [Текст]: учебное пособие / В.П. Малый, В.Н. Масаев. – Железногорск: ФГБОУ ВО СПСА ГПС МЧС России, 2017.– 121 с.
10. Решетько, М.В. Основы гидравлики, гидрологии и гидрометрии [Текст]: учебное пособие / М.В. Решетько.– Томск: Изд-во Томского политех. университета, 2015.– 193 с. – Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/701604>
11. Сазанов, И.И. Гидравлика [Текст]: учебник /И.И. Сазанов, А.Г. Схиртладзе, В.И. Иванов.– М.: КУРС : Инфра-М, 2017.– 320 с.
12. Сапухин, А.А. Основы гидравлики [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.А. Сапухин, В.А. Курочкина.– 2-е изд., (эл.).– М.: МИСИ–МГСУ, 2017.– 116 с.– Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/969012>

13. Ухин, Б.В. Гидравлика [Текст]: учебник / Б.В. Ухин, А.А. Гусев.– М.: Инфра-М, 2018.– 432 с.
14. Филин, В.М. Гидравлика, пневматика и термодинамика [Текст]: курс лекций / под ред. В.М. Филина.– М.: ФОРУМ: Инфра-М, 2018.– 318 с.
15. Шейпак, А.А. Гидравлика и гидропневмопривод. Основы механики жидкости и газа [Текст]: учебник / А.А. Шейпак.– 6-е изд., испр. и доп.– М.: Инфра-М, 2019.– 272 с.
16. Штрассер, В.В. Основы гидравлики [Электронный ресурс] : учебное пособие. – Липецк: Липецкий ГПУ, 2017.– 59 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/111980>
17. Юдаев В.Ф. Гидравлика [Текст]: учебное пособие / В.Ф. Юдаев.– М.: Инфра-М, 2018.– 301 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа 1	
Измерение гидростатического давления и экспериментальное подтверждение закона Паскаля	4
Лабораторная работа 2	
Определение опытным путем слагаемых уравнения Д. Бернулли при установившемся неравномерном движении жидкости в напорном трубопроводе	8
Лабораторная работа 3	
Экспериментальная иллюстрация ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости, определение законов сопротивления и критического числа Рейнольдса	13
Лабораторная работа 4	
Изучение гидравлических сопротивлений напорного трубопровода с определением коэффициентов гидравлического трения и местных сопротивлений	18
Лабораторная работа 5	
Изучение истечения жидкости через малые отверстия в тонкой стенке и насадки при постоянном напоре в атмосферу.....	24
Лабораторная работа 6	
Экспериментальное изучение прямого гидравлического удара в напорном трубопроводе	28
Список литературы.....	32

Ответственный за выпуск В.И. Баронов
Корректор Г.Н. Елисеева

Заказ № 195–Р. Тираж 50 экз. Подписано в печать 11.09.2019 г.
ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Емельянова, 1