

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Учебно-методическое пособие
к лабораторным работам

Пенза 2015

УДК 532.51
ББК 30.123
О-75

Рекомендовано Редсоветом университета
Рецензенты: доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Строительные
конструкции» Н.Н. Ласьков (ПГУАС);
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Техносферная безопасность»
М.Я. Кордон (ПГУ)

Основы механики жидкости и газа: учеб.-метод. пособие к
О-75 лабораторным работам / Б.М. Гришин, И.А. Каледа, А.С.Кочергин,
М.А.Сафронов. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 64 с.

Описаны лабораторные работы по измерению гидростатических давлений и определению равнодействующей силы избыточного давления на вертикальную плоскую поверхность; исследованию режимов движения жидкости; опытному определению коэффициентов гидравлического трения в трубах, коэффициентов местных сопротивлений; построению опытных графиков удельных энергий потока для короткого трубопровода.

Пособие подготовлено на кафедре «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника» и предназначено для использования студентами, обучающимися по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство», при изучении дисциплины «Основы механики жидкости и газа».

© Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства, 2015
© Гришин Б.М., Каледа И.А.,
Кочергин А.С, Сафронов М.А., 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебном пособии представлено семь лабораторных работ, в каждой из которых сформулирована цель исследования, приведены теоретические основы исследования, дано описание экспериментальных установок, изложен порядок проведения опытов, предложены рекомендации по обработке опытных данных и проведению научных исследований. Завершают работы вопросы для самопроверки.

В первой лабораторной работе студенты знакомятся на практике с приборами для измерения гидростатического давления и осваивают методику вычисления абсолютного давления в газе и жидкости по показаниям приборов. На основе сравнения результатов измерений с теоретическими значениями производят оценку точности измерений гидростатического давления.

Во второй лабораторной работе студенты экспериментально с использованием двух способов определяют равнодействующую силу гидростатического давления жидкости, действующую на вертикальную поверхность напорной емкости. Кроме того, на основе дополнительных исследований определяют аналитическим путем величину силы и точку ее приложения, а также сравнивают результаты экспериментальных и аналитических исследований.

При исследовании режимов движения жидкости в третьей лабораторной работе студенты, наблюдая визуальные признаки ламинарного и турбулентного движений, дают оценку режиму движения по критерию подобия Рейнольдса.

В ходе выполнения четвертой, пятой и шестой работ на основе измерения гидростатического давления, определения объёмным способом расхода жидкости по трубам различного диаметра, используя уравнение Бернулли, находят опытные коэффициенты гидравлического трения труб и местных сопротивлений при установившемся турбулентном движении воды в трубах.

Седьмая работа посвящена исследованию короткого трубопровода в горизонтальном и наклонном положениях. На основе уравнения Бернулли строятся графики изменения удельных энергий потока (полной и потенциальной), исследуется влияние на них изменения геометрического и скоростного напоров.

Учебное пособие направлено на формирование у студентов общепрофессиональных компетенций, таких, как: способности использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и математического (компьютерного) моделирования, теоретического и экспериментального исследования (ОПК-1); способности выявлять естественнонаучную сущ-

ность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат (ОПК-2).

По материалам, изложенным в пособии, просим направлять свои отзывы и пожелания на кафедру водоснабжения, водоотведения и гидротехники ПГУАС.

ВВЕДЕНИЕ

Теоретическое изучение свойств, состояния покоя и движения жидкостей и газов является весьма сложным. Математическое описание протекающих в реальной жидкости процессов всегда приближенно, а вносимые допущения, принятые гипотезы могут быть подтверждены только экспериментом.

Экспериментальные исследования в настоящее время проводятся с учетом требований теории подобия, на основе теории планирования эксперимента. Результаты исследований оцениваются с точки зрения точности проведенных измерений и вычислений.

С учетом вышеизложенного в данном учебном пособии рассмотрены основы теории гидростатики и гидродинамики, а также даны рекомендации к проведению лабораторных работ по курсу Б2.В.ОД.1.2 «Основы механики жидкости и газа».

Из многочисленных вопросов, рассматриваемых гидромеханикой, в лабораторный курс вошли те, которые представляют наибольший интерес для дипломированного бакалавра-строителя:

1. Давление жидкости на стенки сосудов и сооружений, с которыми она соприкасается; методы определения равнодействующих сил давления на вертикальные и горизонтальные стенки сооружений.

2. Движение жидкостей в длинных трубопроводах: методы определения пропускной способности различных трубопроводов, величины потерь удельной энергии в них, расчеты коэффициента гидравлического трения.

3. Движение жидкости в коротких трубопроводах. Знание этого раздела позволит решать такие задачи, как расчеты систем внутреннего водоснабжения зданий и сооружений.

Следует отметить, что в процессе выполнения лабораторных работ студент осваивает методы обработки экспериментальных данных, а также получает опыт работы со справочной литературой.

Лабораторная работа №1.

ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Цель работы – изучение закона распределения давления в жидкости; приобретение практических навыков измерения как избыточного, так и вакуумметрического гидростатических давлений.

1.1. Теоретические основы исследования

Гидростатическое давление p представляет собой предел отношения силы гидростатического давления P к площади её действия ω при стремлении ω к нулю:

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

где ω – величина некоторой площади внутри жидкости или на ее поверхности;

P – сила давления жидкости на эту площадь.

Ограничимся рассмотрением жидкости, находящейся под действием только одной объемной силы – силы тяжести. В этом случае *абсолютное гидростатическое давление* в рассматриваемой точке рассчитывают по формуле

$$p_A = p_0 + \rho \cdot g \cdot h, \quad (1.2)$$

где p_0 – давление на свободной поверхности жидкости или внешнее давление, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, $g=9,81$ м/с²;

h – глубина погружения рассматриваемой точки под свободную поверхность жидкости, м.

Свободной поверхностью называют поверхность контакта жидкости с газовой средой.

Давление, обусловленное весом самой жидкости и определяемое вторым слагаемым правой части формулы (1.2), называется *весовым давлением*. Обозначим весовое давление p' :

$$p' = \rho \cdot g \cdot h. \quad (1.3)$$

Если рассматриваемая покоящаяся жидкость находится в открытом сосуде, то давление p_0 , действующее на свободной поверхности, оказывается равным атмосферному $p_{\text{атм}}$, то есть $p_0 = p_{\text{атм}}$. Тогда абсолютное гидростатическое давление p_A в рассматриваемой точке определяют как

$$p_A = p_{\text{атм}} + \rho \cdot g \cdot h = p_{\text{атм}} + p'. \quad (1.4)$$

Величина превышения абсолютного давления над атмосферным называется *избыточным или манометрическим давлением*, его измеряют с помощью манометров

$$p_{\text{изб}} = p_{\text{ман}} = p_A - p_{\text{атм}} \quad (1.5)$$

и в случае открытого сосуда, как следует из уравнения (1.3), избыточное давление равняется весовому давлению:

$$p_{\text{изб}} = p' = \rho \cdot g \cdot h. \quad (1.6)$$

Если давление на свободной поверхности оказывается больше атмосферного $p_0 > p_{\text{атм}}$ (это возможно, когда жидкость находится в герметически закрытом сосуде), то

$$p_A = p_0 + \rho \cdot g \cdot h = p_0 + p' = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}}, \quad (1.7)$$

где
$$p_{\text{изб}} = (p_0 - p_{\text{атм}}) + p' = (p_0 - p_{\text{атм}}) + \rho \cdot g \cdot h, \quad (1.8)$$

или
$$p_{\text{изб}} = p_{0\text{изб}} + \rho \cdot g \cdot h; \quad (1.9)$$

здесь $p_{0\text{изб}}$ – избыточное давление на свободной поверхности жидкости.

Если абсолютное давление оказывается меньше атмосферного, то есть $p_A < p_{\text{атм}}$, то в этой среде имеет место *вакуум*, или разрежение. Абсолютное давление в этом случае определяют по формуле

$$p_A = p_{\text{атм}} - \rho \cdot g \cdot h_{\text{вак}}, \quad (1.10)$$

где $h_{\text{вак}}$ – вакуумметрическая высота.

Под величиной вакуумметрического давления (вакуума) понимают недостаток давления до атмосферного. Его измеряют вакуумметром. Вакуумметрическое давление иногда называют отрицательным избыточным давлением:

$$p_{\text{вак}} = p_{\text{атм}} - p_A = \rho \cdot g \cdot h_{\text{вак}} = -p_{\text{изб}}. \quad (1.11)$$

Единицей измерения любого вида гидростатического давления в международной системе единиц является паскаль ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$), а в часто используемой старой технической литературе и при градуировке приборов в системе МКГС – техническая атмосфера ($1 \text{ атм} = 1 \text{ кг/см}^2$). Часто гидростатическое давление измеряют высотой столба жидкости известного объемного веса, например высотой столба воды в метрах (м вод. ст.) или ртути в миллиметрах (мм рт. ст.). Соотношение между единицами измерения давления можно представить в следующем виде:

$$1 \text{ атм} = 1 \text{ кг/см}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} \approx 10^5 \text{ Па} \approx 0,1 \text{ МПа} \approx 100 \text{ кПа} = 10 \text{ м вод. ст.} = 760 \text{ мм рт. ст.}$$

1.2. Описание экспериментального стенда

Стенд состоит из питающего и герметичного баков Б1 и Б2, центробежного насоса Н1, всасывающего, напорных и соединительных трубопроводов, запорной арматуры, измерительных приборов и устройств.

Бак Б1 выполнен из полимерного материала и разделён вертикальной перегородкой на две полости: сливную и накопительную. Сливная полость предназначена для поддержания постоянного уровня и, следовательно, подпора на выходе сливного трубопровода с краном КР5. Из накопительной полости бака Б1 осуществляется забор воды насосом Н1.

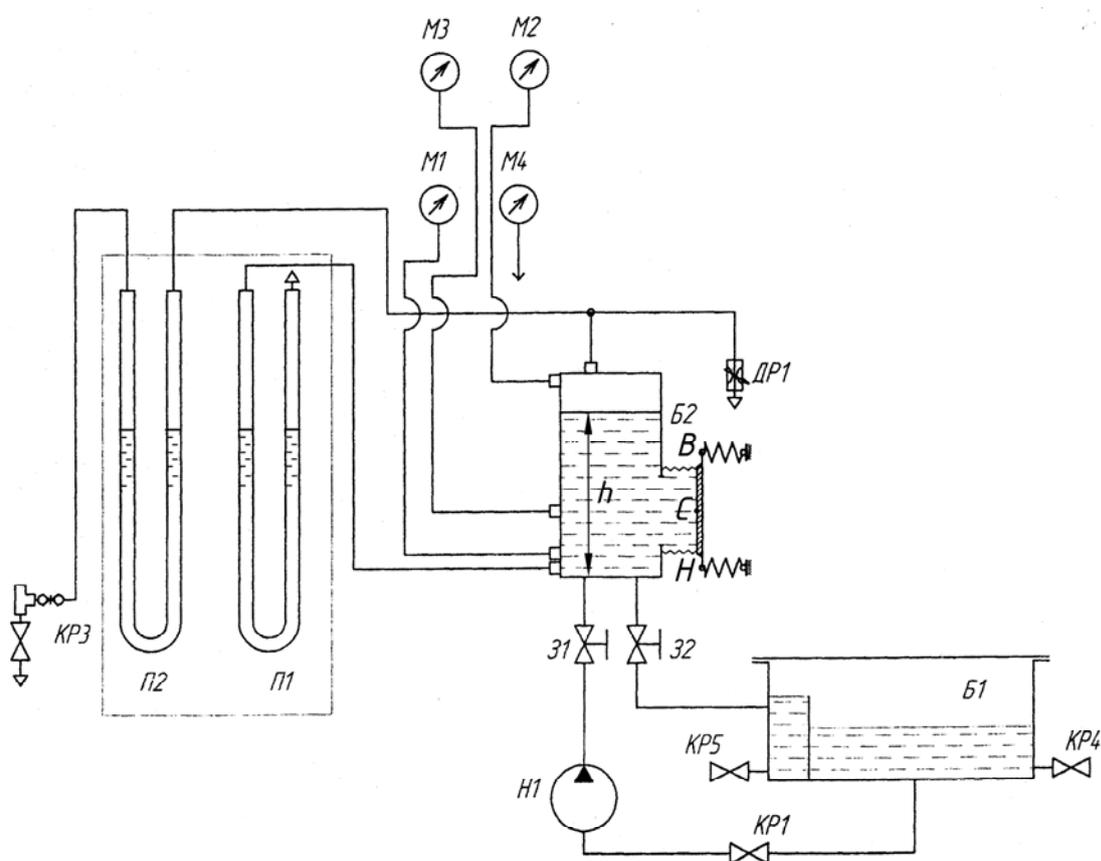


Рис. 1.1. Схема лабораторного стенда:

Б1 – питающий (регулирующий) бак с водомерным стеклом; Б2 – герметичный бак; Н1 – циркуляционный центробежный насос; КР1...КР5 – шаровые краны; ДР1 – кран связи с атмосферой (дроссель); 31...32 – клиновая задвижка; П1, П2 – пьезометры; М1, М2, М3, М4 – датчики давления

Бак Б2 представляет собой герметичную ёмкость из полимерного материала, сообщающуюся с атмосферой через дроссель ДР1.

Стенд работает по принципу создания избыточного давления путем нагнетания жидкости динамическим насосом в замкнутый объём. Для

* Уровни воды в пьезометрах П1 и П2 показаны при открытом дросселе ДР1.

этого рабочая жидкость (вода) насосом по трубопроводам из питающего бака нагнетается в герметичный бак при закрытом дросселе ДР1. Уровень воды в баке Б2 регулируется задвижкой 31 и контролируется с помощью водомерного стекла.

Вакуум на свободной поверхности воды в баке Б2 создаётся при увеличении объема воздушного пространства бака путём сброса воды через задвижку 32 при закрытом дросселе ДР1.

Гидростатическое давление на стенде измеряется пьезометрами П1, П2 и датчиками давления М1, М2, М3, М4, результаты замеров по которым отражаются на цифровых табло в килопаскалях (кПа).

Датчики давления при измерении избыточного давления показывают результаты со знаком плюс, а при измерении вакуумметрического – со знаком минус.

1.3. Порядок проведения опытов

Для создания избыточного давления в баке Б2 необходимо сделать следующее:

1. Убедиться в том, что открыт кран КР1.
2. Открыть задвижки 31 и 32, а также кран КР1.
3. Полностью открыть дроссель ДР1.
4. Убедиться в том, что сливная полость бака Б1 наполнилась (по показаниям указателя уровня на торце бака). Проконтролировать, что уровень в сливной полости выше верхнего сечения трубки указателя уровня (трубка заполнена полностью). Включить питание системы управления и электродвигателя насоса.

Убедиться, что в герметичном баке Б2 нет воды, а давление равно атмосферному: по показаниям табло М2 его значение должно быть 0 ± 4 кПа. Для исключения погрешности измерений, вызванной временными и погодными колебаниями атмосферного давления, произвести коррекцию начала отсчета (нуля) шкалы избыточного давления. Для этого следует нажать кнопку-корректор на боковой поверхности табло.

5. Заполнить жидкостью герметичный бак Б2, для этого:
 - Закрыть задвижку 32. Открывая задвижку 31, установить уровень жидкости в баке Б2 равным 250...300 мм, отслеживая его значение по указателю уровня.
 - После достижения требуемого уровня закрыть задвижку 31.
6. Закрыть дроссель ДР1, изолировав от атмосферы воздушное пространство, находящееся над жидкостью в баке Б2. Открыть кран КР3, связав левое колено U-образного пьезометра П2 с атмосферой.

7. Приоткрыть задвижку 31, уменьшив объем воздуха в баке столбом жидкости. Давление над свободной поверхностью воды в баке Б2 превысит

атмосферное, что приведёт к росту разности уровней в U-образной трубке пьезометра П2 (вода в левом колене будет выше). В пьезометре П1 разность уровней воды будет больше, чем в пьезометре П2, за счет весового давления жидкости в баке Б2.

8. При достижении разности уровней жидкости в пьезометре П2 примерно в 150 см закрыть задвижку 31 полностью. Определить разность уровней в пьезометре П1.

9. Определить давление над свободной поверхностью воды в баке Б2 по показаниям М2 и давление воды на дно бака по датчику М1. Записать в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1

Измерение избыточного гидростатического давления над свободной поверхностью воды и на дно бака

Параметр / Номер опыта	0 (пример)	1	2	3
1. Разность уровней воды в пьезометре П2 $\Delta h_{П2}$, м	1,20	1,50	1,00	0,50
2. Показания датчика давления $p_{М2}$, кПа	11,69			
3. Расчётное значение избыточного давления $p_{П1}$, кПа	11,77			
4. Относительная ошибка определения давления Δ_{p2} , %	0,68			
5. Абсолютное давление над свободной поверхностью воды в баке $p_{А0}$, кПа	109,79			
6. Разность уровней воды в пьезометре П1 $\Delta h_{П1}$, м	1,45			
7. Показания датчика давления $p_{М1}$, кПа	14,35			
8. Расчётное значение избыточного давления $p_{ДН}$ на дно, кПа	14,32			
9. Относительная ошибка определения давления Δ_{p1} , %	0,9			
10. Абсолютное давление на дно в бака $p_{АД}$, кПа	112,45			
11. Глубина воды в баке по показаниям датчиков h , м	0,27			

10. Приоткрыв задвижку 32, понизить уровень воды в баке Б2 до достижения разности уровней жидкости в пьезометре $\Delta h_{П2}$ примерно до 100 см. Определить разность уровней в пьезометре П1. Определить давление над свободной поверхностью воды в баке Б2 по показаниям М2 и давление на дно бака по датчику М1. Записать в табл. 1.1.

11. Ещё раз понизить уровень воды в баке Б2 до достижения разности уровней жидкости в пьезометре $\Delta h_{П2}$ примерно в 50 см, приоткрыв задвижку 32. Определить разность уровней в пьезометре П1. Определить давление над свободной поверхностью бака Б2 по показаниям М2 и давление на дно бака по датчику М1. Записать в табл. 1.1.

12. Выключить питание системы управления.

13. Открыть задвижку 32. После этого открыть дроссель ДР1.

Для создания разрежения на свободной поверхности воды в баке Б2 необходимо сделать следующее:

1. Повторить первые 6 пунктов из предыдущих исследований.

2. Выключить питание электродвигателя насоса.

3. Для снижения уровня жидкости в баке Б2 открыть задвижку 32. При снижении уровня воды в баке будет возрастать объем, предоставленный газовой среде. Давление над свободной поверхностью воды в баке Б2 станет меньше атмосферного. Это приведёт к росту недостатка давления до атмосферного, т.е. к росту разности уровней в U-образной трубке пьезометра П2 (вода в правом колене будет выше).

4. При достижении разности уровней жидкости в пьезометре П2 примерно в 20 см задвижку 32 закрыть полностью. Определить разность уровней в пьезометре П1.

5. Определить давление над свободной поверхностью воды в баке Б2 по показаниям М2 и давление на дно бака по датчику М1. Записать в табл. 1.2.

6. Повторяя действия по пп. 3...5, произвести измерения при различных значениях разности уровней жидкости в пьезометре $\Delta h_{П2}$: -40 или -60 см.

Т а б л и ц а 1.2

Измерение вакуумметрического гидростатического давления над свободной поверхностью воды в баке

Параметр / Номер опыта	0 (пример)	1	2	3
1	2	3	4	5
1. Разность уровней воды в пьезометре П2 $\Delta h_{П2}$, м	-0,30	-0,20	-0,40	-0,60
2. Показания датчика давления $p_{М2}$, кПа	-3,12			
3. Расчётное значение давления $p_{ПИ}$, кПа	-2,94			
4. Относительная ошибка определения давления Δp_2 , %	5,8			
5. Абсолютное давление над свободной поверхностью воды в баке $p_{А0}$, кПа	94,98			
6. Разность уровней воды в пьезометре П1 $\Delta h_{П1}$, м	-0,17			
7. Показания датчика давления $p_{М1}$, кПа	-1,64			

1	2	3	4	5
8. Расчётное значение избыточного давления на дно, кПа	-1,7			
9. Относительная ошибка определения давления Δ_{p1} , %	3,5			
10. Абсолютное давление на дно в бака $p_{Ад}$, кПа	99,54			
11. Глубина воды в баке по показаниям датчиков h , м	0,15			

7. Выключить питание системы управления.
8. Открыть задвижку 32. После этого открыть дроссель ДР1.
9. Приступить к обработке результатов опытов.

1.4. Обработка опытных данных

1. Используя показания пьезометра П2, рассчитать избыточное давление воздуха над свободной поверхности воды в баке Б2, кПа:

$$p_{П2} = 10^{-3} \rho_{В} \cdot g \cdot \Delta h_{П2}, \quad (1.12)$$

где $\Delta h_{П2}$ – разность уровней жидкости в пьезометре П2 стенда, м;

$\rho_{В}$ – плотность воды, $\rho_{В} = 1000 \text{ кг/м}^3$;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

В расчётах избыточного давления (см. табл. 1.1) величина $\Delta h_{П2}$ положительна, в расчётах вакуумметрического давления – отрицательна (см. табл. 1.2). Используя показания пьезометра П1, рассчитать избыточное давление воздуха и столба воды на дно бака Б2, кПа.

$$p_{П1} = 10^{-3} \rho_{В} \cdot g \cdot \Delta h_{П1}, \quad (1.13)$$

При отрицательной величине $\Delta h_{П2}$ величина $\Delta h_{П1}$ может быть отрицательной, положительной или равной 0.

2. Полученные результаты записать в табл. 1.1 и 1.2.
3. Определить ошибку измерений:
– для датчика М1

$$\Delta_{p1} = \frac{|p_{М1} - p_{П1}|}{p_{П1}} \times 100, \%; \quad (1.14)$$

– для датчика М2

$$\Delta_{p2} = \frac{|p_{M2} - p_{ПИ}|}{p_{ПИ}} \times 100, \%. \quad (1.15)$$

4. Определить величину абсолютного давления на свободной поверхности воды в баке и на дно бака по показаниям датчика давления, приняв следующее значение атмосферного давления $p_{атм} = 98,1$ кПа:

$$p_{A0} = p_{атм} + p_{M2}. \quad (1.16)$$

$$p_{Ad} = p_{атм} + p_{M1}. \quad (1.17)$$

5. Определить глубину воды в баке Б2 по показаниям датчиков:

$$h = \frac{p_{M1} - p_{M2}}{\rho_B \cdot g} \cdot 10^3, \text{ м}. \quad (1.18)$$

Вопросы для самопроверки

1. Какое давление называют абсолютным, избыточным, весовым, манометрическим и вакуумметрическим?
2. Какие единицы измерения давления Вы знаете? Как они соотносятся?
3. Какие приборы для измерения давления Вы знаете? Какова область их применения?
4. Как по показаниям манометров и вакуумметров определить абсолютное давление?

Лабораторная работа №2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКУЮ СТЕНКУ

Цель работы – экспериментальное определение силы давления жидкости на плоскую вертикальную поверхность при избыточном и вакуумметрическом давлении и сравнение полученных результатов с теоретическими расчётами.

2.1. Теоретические основы исследования

Гидростатическое давление (ГСД) в любой точке жидкости всегда направлено по внутренней нормали к действующей площадке и определяется по основному уравнению гидростатики. Согласно формуле (1.1), сила давления равна произведению величины давления на площадь поверхности, находящейся в жидкости.

Силу давления жидкости на любую плоскую поверхность P можно рассматривать как сумму двух сил давления: суммарного внешнего давления P_0 и суммарного весового давления P' :

$$P = P_0 + P', \quad (2.1)$$

где $P_0 = p_0 \omega$, (2.2)

$$P' = \rho \cdot g \cdot h_c \cdot \omega. \quad (2.3)$$

Здесь h_c – глубина погружения центра тяжести смоченной поверхности.

Или
$$P = (p_0 + \rho \cdot g \cdot h_c) \omega = p_c \cdot \omega, \quad (2.4)$$

где p_c – величина ГСД в центре тяжести площади ω .

Величина силы суммарного гидростатического давления, действующего на плоскую поверхность, равна произведению гидростатического давления в центре тяжести смоченной поверхности на площадь этой поверхности.

Сооружения, находящиеся в воздушной среде, испытывают атмосферное давление как с внешней, так и с внутренней стороны. Поэтому эти сооружения следует рассчитывать только на действие избыточного давления:

$$P' = P = \rho \cdot g \cdot h_c \omega. \quad (2.5)$$

Сила суммарного весового давления P приложена в точке D – в центре давления (рис. 2.1).

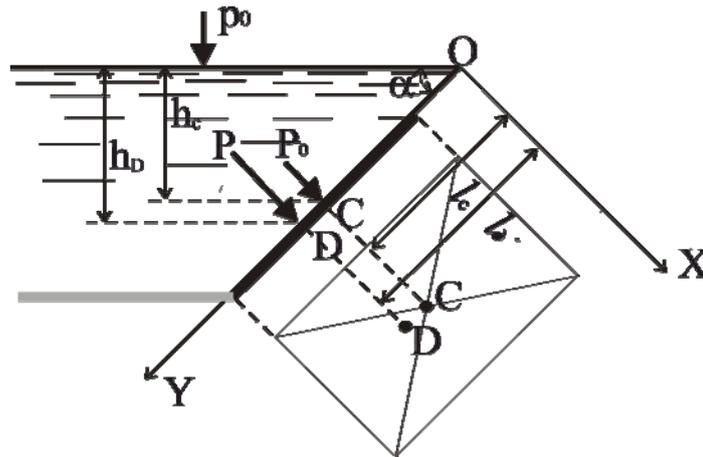


Рис. 2.1. Расчетная схема определения силы гидростатического давления, действующей на плоскую наклонную поверхность, и точки её приложения

Обозначив глубину погружения центров тяжести и давления плоской поверхности (стенки) через h_c и h_d , а расстояние вдоль стенки от поверхности жидкости до центра тяжести – l_c и до центра давления – l_d , запишем:

1) для наклонной стенки:

$$l_d = l_c + \frac{I_0}{\omega \cdot l_c} \quad (2.6)$$

или

$$l_c = \frac{h_c}{\sin \alpha}; \quad (2.7)$$

где α – угол наклона стенки к свободной поверхности;

I_0 – момент инерции плоской поверхности относительно её центра тяжести;

2) для вертикальной стенки:

$$h_d = h_c + \frac{I_0}{\omega \cdot h_c}; \quad (2.8)$$

3) для горизонтальной стенки $h_d = h_c$, т.е. центры тяжести и давления совпадают.

Для плоской стенки, имеющей форму круга диаметром d , момент инерции определяется по формуле

$$I_0 = \frac{\pi d^4}{64}. \quad (2.9)$$

2.2. Описание экспериментального стенда

При выполнении настоящей работы исследования проводятся на лабораторном стенде, схема которого приведена на рис. 1.1. Он состоит из питающего и герметичного баков Б1 и Б2, центробежного насоса Н1, всасывающего, напорных и соединительных трубопроводов, запорной арматуры, измерительных приборов и устройств.

Бак Б2 (рис. 2.2) представляет собой герметичную ёмкость из полимерного непрозрачного материала, оборудованную водомерным стеклом 8, питающим 7 и сливным 6 трубопроводами. На боковой поверхности этого бака предусмотрено круглое отверстие 2 диаметром $d=245$ мм, закрытое круглой подвижной крышкой 3. С наружной стороны крышка поддерживается фиксатором и пружинами 4, установленными в два ряда. Подвижность крышки и герметичность ее соединения с емкостью обеспечиваются оболочкой из гофрированной резины.

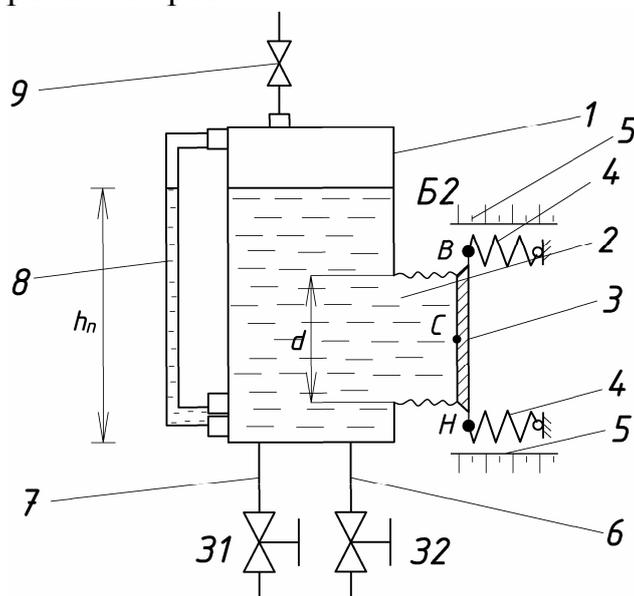


Рис. 2.2. Схема обвязки герметичного бака Б2 лабораторного стенда (см. рис. 1.1):

1 – герметичный бак; 2 – отверстие на боковой стенке $d=245$ мм; 3 – подвижная крышка; 4 – пружина; 5 – измеритель деформации пружины; 6 – сливной трубопровод; 7 – питающий трубопровод; 8 – водомерное стекло; 9 – дроссель

Под действием гидростатического давления крышка имеет возможность перемещаться вдоль специальных направляющих штоков на расстояние, которое определяется жесткостью нагружающих пружин 4. Величина деформаций пружин может быть измерена с помощью мерных устройств 5.

При избыточном давлении над свободной поверхностью воды в баке крышка под его воздействием перемещается вправо, растягивает гофрированную вставку и сжимает пружину. При проведении опытов с вакуумметрическим давлением на свободной поверхности воды в баке крышка втяги-

ваются, сжимает гофрированную вставку и растягивает пружину. В опытах из-за этого несколько меняется площадь крышки, воспринимающая давление жидкости: при растягивании гофрированной вставки она больше, чем при ее сжатии, т.е. площадь круглой крышки f при избыточном давлении в баке составляет $f = 6,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, а при вакуумметрическом давлении в баке $-f = 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$.

Для определения давления на свободной поверхности воды в баке Б2 используются датчик давления p_{M2} и U-образный пьезометр П2 (см. рис. 1.1). Для определения давления в центре тяжести исследуемой поверхности (круглой крышки отверстия в боковой стенке бака) p_{M3} применяется датчик давления М3 (см. рис. 1.1). Величина давления (избыточного или вакуумметрического) в кПа выводится в соответствующие окна на табло давлений.

2.3. Порядок проведения опытов

Для создания избыточного давления в баке Б2 необходимо сделать следующее:

1. Провести подготовительные работы перед включением стенда (см. п. 1-6 подразд. 1.3).

2. Приоткрывая задвижку 31, поднять уровень воды в баке Б2 в пределах 250-300 мм при давлении над свободной поверхностью воды в баке Б2 на уровне атмосферного ($p_{M2}=0$ кПа), определяемом по показаниям датчика давления М2, затем закрыть задвижку 31 полностью.

3. Определить:

- разность уровней воды в U-образной трубке пьезометра П2 – $h_{П2}$;
- фактический уровень жидкости в герметичном баке $h_{П}$ по показаниям указателя уровня, установленного на боковой стенке бака (см. рис.2.2);
- давление в центре тяжести крышки отверстия p_{M3} по показаниям датчика давления.

Записать результаты измерений в графу 2 табл. 2.1.

4. Замерить величину сжатия пружин: верхних $X_{СВ1}$, $X_{СВ2}$; нижних $X_{СН1}$, $X_{СН2}$. Результаты записать в табл. 2.1.

5. Закрыть дроссель ДР1. Приоткрыв задвижку 31, за счет сжатия объема воздуха в баке Б2, поднять давление над свободной поверхностью воды p_{M2} примерно до 5 кПа (по показаниям датчика М2). Повторить измерения по пп. 3 и 4. Записать результаты в графу 3 табл. 2.1.

6. Увеличить давление до 10 кПа и повторить измерение по пп. 3 и 4. Записать результаты в графу 4 табл. 2.1.

7. Для создания вакуумметрического давления на свободной поверхности бака открыть задвижку 32, контролируя разрежение над свободной поверхностью в баке Б2 по показаниям датчика давления М2 (p_{M2}).

Таблица 2.1

Измерение силы гидростатического давления

Параметры	Избыточное давление на свободной поверхности воды в баке p_{M2} , кПа			
	0	5	10	- 6
1	2	3	4	5
1. Давление в центре крышки на стенке бака p_{M3} , кПа				
2. Разность уровней жидкости в пьезометре П2 $h_{П2}$, м				
3. Высота столба жидкости в баке $h_{П}$, м				
4. Теоретическая сила давления P_T , Н				
5. Величина сжатия первой верхней пружины X_{CB1} , мм				
6. Величина сжатия первой нижней пружины X_{CH1} , мм				
7. Величина сжатия второй верхней пружины X_{CB2} , мм				
8. Величина сжатия второй нижней пружины X_{CH2} , мм				
9. Реакция со стороны верхних пружин R_B , Н				
10. Реакция со стороны нижних пружин R_H , Н				
11. Экспериментальная сила давления, определяемая по сопротивлению пружин P^I , Н				
12. Относительная ошибка определения P^I , Δ_P^I , %				
13. Экспериментальная сила давления, определяемая по опытному давлению в центре крышки отверстия P^{II} , Н				
14. Относительная ошибка определения P^{II} , Δ_P^{II} , %				
15. Смещение центра давления относительно центра тяжести крышки отверстия ΔY_D^T , см (рис. 2.3)				
16. Ордината центра давления относительно плоскости пьезометрического напора h_D , см (рис. 2.3)				

8. Закрыть задвижку 32 при достижении давления $p_{M2} = -6$ кПа.
9. Повторить действия по пп.3-4, совершить замеры и расчеты для случая, когда давление на свободной поверхности воды ниже атмосферного. Результаты занести в графу 5 табл. 2.1.
10. Выключить питание электродвигателя насоса и питание системы управления.
11. Открыть задвижку 32. После этого открыть дроссель ДР1.
12. Приступить к обработке результатов опытов.

2.4. Обработка опытных данных

1. Рассчитать экспериментальную равнодействующую сил давления на плоскую стенку по формуле

$$P_{\text{Э}}^I = R_{\text{В}} + R_{\text{Н}}, \quad (2.10)$$

где $R_{\text{В}}, R_{\text{Н}}$ – силы реакции на плоскую стенку со стороны верхних и нижних пружин, Н:

$$R_{\text{В}} = C_{\text{ПР}} X_{\text{СВ1}} + C_{\text{ПР}} X_{\text{СВ2}} = C_{\text{ПР}}(X_{\text{СВ1}} + X_{\text{СВ2}}), \quad (2.11)$$

$$R_{\text{Н}} = C_{\text{ПР}} X_{\text{СН1}} + C_{\text{ПР}} X_{\text{СН2}} = C_{\text{ПР}}(X_{\text{СН1}} + X_{\text{СН2}}), \quad (2.12)$$

где $X_{\text{СВ1}}, X_{\text{СВ2}}$ – величина сжатия первой и второй верхних пружин соответственно, мм;

$X_{\text{СВ1}}, X_{\text{СВ2}}$ – величина сжатия первой и второй нижних пружин соответственно, мм;

$C_{\text{ПР}}$ – жесткость пружины, $C_{\text{ПР}} = 5,6$ Н/мм.

2. Рассчитать вторым способом экспериментальную равнодействующую сил давления на плоскую стенку по формуле

$$P_{\text{Э}}^{II} = p_{\text{С}} \cdot f, \quad (2.13)$$

где f – площадь круглой крышки: при избыточном давлении в баке $f = 6,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$; при вакуумметрическом давлении в баке $f = 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$;

$p_{\text{С}}$ – давление в центре плоской круглой крышки, величина которого определена по показаниям датчика давления М3: $p_{\text{С}} = p_{\text{М3}}$.

3. Определить теоретическую силу давления на крышку при избыточном давлении на свободной поверхности:

$$P_{\text{Т}} = (p_{0\text{изб}} + \rho \cdot g(h_{\text{П}} - Y_{\text{С}})) \times f, \quad (2.14)$$

где $p_{0\text{изб}}$ – давление над свободной поверхностью в баке, которое определяется по показаниям датчика давления М2: $p_0 = p_{\text{М2}}$;

$h_{\text{П}}$ – глубина жидкости в баке, которая определяется по водомерному стеклу, установленному на боковой поверхности герметичного бака (см. рис. 2.2);

Y_c – расстояние от центра тяжести крышки отверстия до дна бака,
 $Y_c = 127 \text{ мм} = 0,127 \text{ м}$ (рис. 2.3).

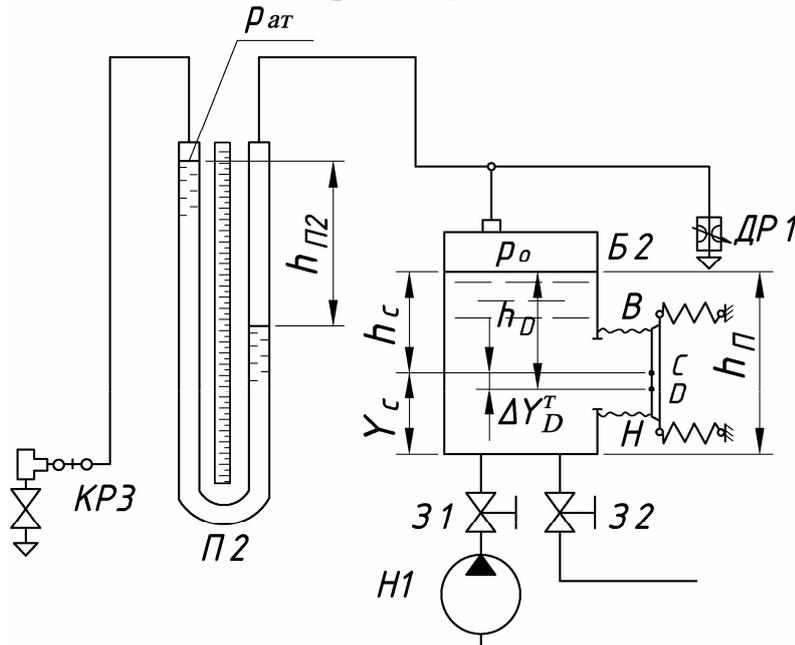


Рис. 2.3. Расчетная схема для определения точки приложения равнодействующей силы давления

4. Учитывая, что избыточное давление на свободной поверхности воды в баке Б2 $p_{0\text{изб}}$ можно в опытах определить по показаниям U-образного пьезометра, преобразуем уравнение (2.14):

$$P_T = (\rho \cdot g \cdot h_{\text{П2}} + \rho \cdot g(h_{\text{П}} - Y_c)) \times f = \rho \cdot g \cdot f(h_{\text{П2}} + h_c), \quad (2.15)$$

где $h_{\text{П2}}$ – разность уровней воды в ветвях U-образного пьезометра П2 (см. рис. 2.3);

h_c – глубина погружения центра тяжести крышки (точки С) под свободную поверхность воды в баке (см. рис. 2.3).

5. Определить теоретическую точку приложения равнодействующей давления – центр давления. Схема для нахождения точки приложения силы избыточного давления приведена на рис.2.3.

Ординату центра давления h_D определим по формуле

$$h_D = h_c + \Delta Y_D^T, \quad (2.16)$$

где ΔY_D^T – смещение центра давления относительно центра тяжести круглой крышки,

$$\Delta Y_D^T = \frac{I_0}{h_c \cdot f}; \quad (2.17)$$

здесь I_0 – момент инерции круглой плоской крышки, м^4 , определяемый по (2.9)

В расчетах при избыточном давлении ($f = 6,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$; $d = d_1^{ysl} = 0,29 \text{ м}$)

$$I_0 = \frac{\pi \cdot 0,29^4}{64} = 3,42 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4,$$

а при вакуумметрическом давлении в баке ($f = 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ $d = d_2^{ysl} = 0,25 \text{ м}$)

$$I_0 = \frac{\pi \cdot 0,25^4}{64} = 1,83 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4.$$

6. Оценить точность использованных методов экспериментального определения силы ГСД путем вычисления относительной ошибки, приняв за истинное значение силы ее теоретическую величину:

$$\Delta_P = \left| \frac{P_{\text{Э}} - P_{\text{Т}}}{P_{\text{Т}}} \right| \times 100\%. \quad (2.18)$$

Вопросы для самопроверки

1. Как направлена сила гидростатического давления жидкости?
2. Как называется точка приложения силы весового давления? Как определить ее местоположение?
3. Чему равна величина силы ГСД на плоскую поверхность?
4. Какие способы экспериментального определения силы ГСД реализованы в работе лабораторного стенда?

Лабораторная работа №3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Цель работы – убедиться на опыте в существовании ламинарного и турбулентного режимов течения; экспериментально определить числа Рейнольдса Re , соответствующие указанным режимам движения, и сравнить полученные значения с критическим числом Рейнольдса $Re_{кр}$.

3.1. Теоретические основы исследований

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что потери энергии при движении жидкости существенно зависят от характера движения частиц жидкости в потоке или иначе – от *режима движения жидкости*. Например, в 1880 г. об этом в своей работе «О сопротивлении жидкостей и воздухоплаванию» написал Д.И. Менделеев. Подробно режимы движения были изучены в 1883 году английским физиком О. Рейнольдсом.

Проводя соответствующие эксперименты, О. Рейнольдс установил, что в одном случае струйки потока жидкости движутся в трубе постоянного диаметра параллельно друг другу, поперечное перемешивание частиц жидкости здесь отсутствует. Такой режим движения был назван *ламинарным* (от лат. *lamina* – слой). В другом случае наблюдалось движение частиц жидкости в направлении течения, сопровождающееся их интенсивным поперечным перемешиванием. Траектории движущихся частиц приобретают весьма сложные криволинейные формы. Такой режим движения был назван *турбулентным* (от лат. *turbulentus* – беспорядочный).

Для определения режима движения жидкости О. Рейнольдс на основании опытных исследований предложил безразмерный критерий, который впоследствии получил название числа Рейнольдса:

$$Re = (v \cdot l_{\Pi}) / \nu, \quad (3.1)$$

где v – средняя скорость течения жидкости;

l_{Π} – характерный линейный размер живого сечения потока;

ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости.

В качестве l_{Π} обычно принимают для круглых напорных труб диаметр d , для каналов, труб некруглого сечения или труб круглого сечения, работающих неполным поперечным сечением, гидравлический радиус

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \quad (3.2)$$

где ω – площадь живого сечения;

χ – смоченный периметр.

В соответствии с этим число Рейнольдса для напорных труб круглого поперечного сечения, определяемое по (3.1), можно представить следующим образом:

$$Re = (v \cdot d) / \nu. \quad (3.3)$$

Было установлено, что ламинарный режим с увеличением скоростей движения жидкости может переходить в турбулентный. От турбулентного режима (при уменьшении скорости движения жидкости) можно перейти к ламинарному, но процесс перехода от одного режима к другому не является полностью обратимым.

Переход одного режима движения жидкости в другой происходит при определенном значении числа Рейнольдса, названном критическим $Re_{кр}$. Турбулентный режим переходит в ламинарный при скорости, меньшей той, при которой наблюдается переход от ламинарного к турбулентному. Поэтому были введены понятия нижнего критического числа Рейнольдса $Re_{кр.н}$ и верхнего критического числа Рейнольдса $Re_{кр.в}$. В результате экспериментов были определены для напорных труб круглого поперечного сечения следующие значения указанных величин: $Re_{кр.н} \approx 2320$; $Re_{кр.в} \approx 4000$.

Скорость, соответствующая критическому числу Рейнольдса, также называется критической:

$$v_{кр} = \frac{Re_{кр} \nu}{d}. \quad (3.4)$$

Существование того или другого режима движения определяют из сравнения действительного числа Рейнольдса с $Re_{кр.н}$, полагая, что если $Re > Re_{кр.н}$, то возможен турбулентный режим. Обычно принимают в расчетах значение $Re_{кр} = 2320$. Итак, если $Re < Re_{кр}$, то должен иметь место ламинарный режим; если $Re > Re_{кр}$ – турбулентный режим.

3.2. Описание экспериментальной установки

Учебный стенд состоит из центробежного насоса Н1, основного и накопительного баков, запорной арматуры, измерительных приборов и устройств, соединительных и исследуемых трубопроводов, размещенных на сварной раме и поддонах (рис.3.1).

Вода центробежным насосом Н1 по соединительным трубопроводам из бака Б1 нагнетается в накопительный бак Б2, из которого под постоянным напором подается к исследуемым элементам – трубопроводам Т1, Т2, Т3, Т4, диафрагме Д1, исследуемой задвижке З3.

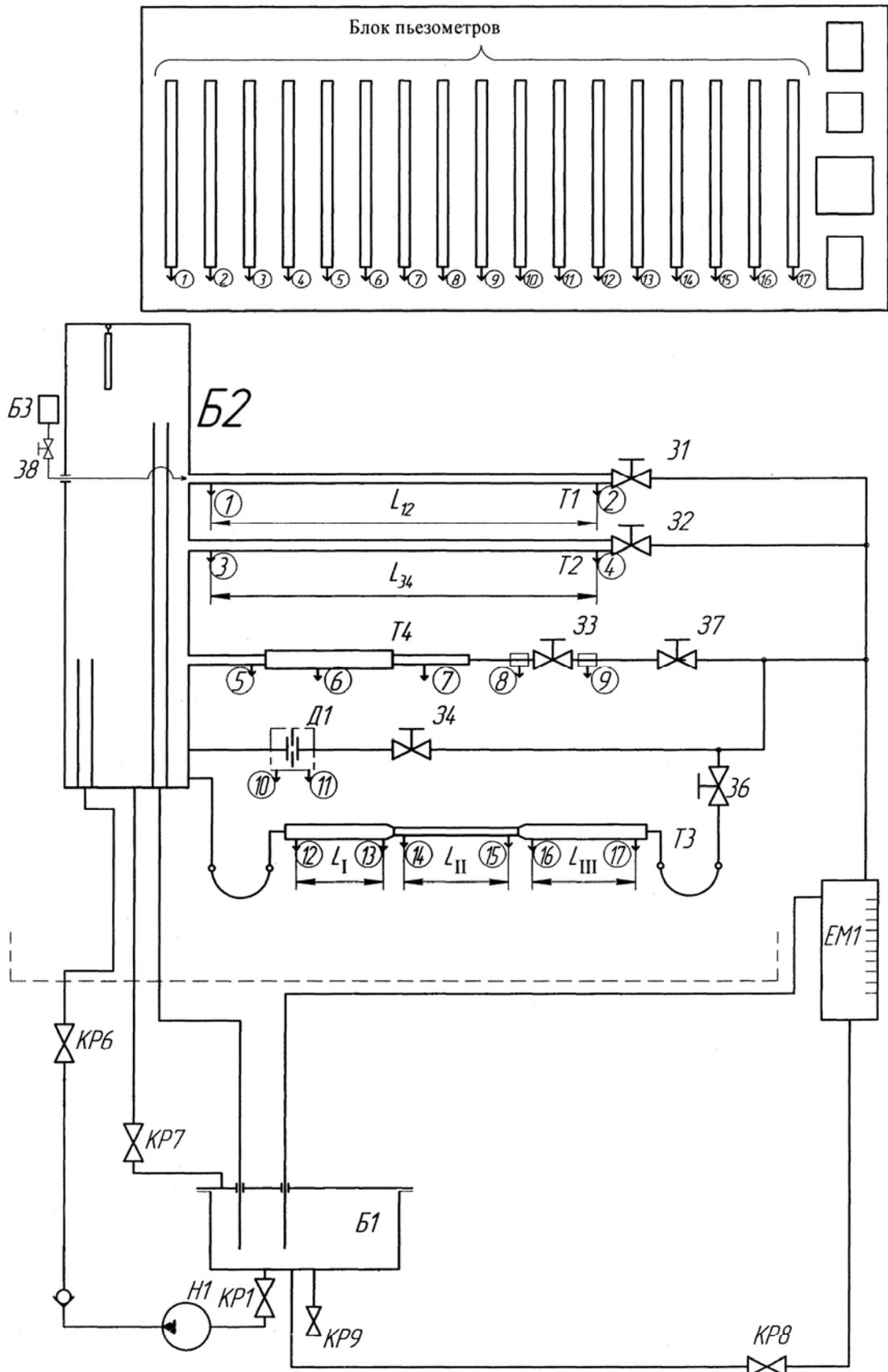


Рис. 3.1. Схема лабораторного стенда по гидродинамическим исследованиям

Переключатель насоса имеет три положения, отмеченных рисками и соответствующих различной производительности насоса: одна риска – минимальная, две риски – средняя, три – максимальная производительность. Для осуществления нормальной работы стенда рекомендуется эксплуатировать насос Н1 в режиме II (средняя производительность).

Накопительный бак представляет собой емкость из оргстекла, внутри которой расположены переливной и подводящий прозрачные патрубки. Высота входного сечения переливного патрубка перегородки на 50 мм ниже стенок корпуса.

При работе стенда вода от насоса Н1 постоянно поступает в накопительный бак Б2. Уровень жидкости соответствует отметке переливного патрубка. Излишек подаваемой насосом Н1 воды через переливной патрубков сливается в бак Б1.

Исследуемые трубопроводы выполнены из прозрачных гладких труб круглого сечения.

Задвижка 38 служит для регулирования подачи в трубопровод Т1 подкрашенной жидкости.

Расходы жидкости через элементы стенда измеряются объемным способом – с помощью мерной емкости ЕМ1, время наполнения которой может определяться по электронному секундомеру при замыкании поплавочных датчиков. Также расход может быть определен путем визуального замера объема по шкале, расположенной на мерной емкости, и времени его наполнения, замеренного с помощью запускаемого вручную секундомера.

Для замера перепадов пьезометрических напоров на участках трубопроводов в состав стенда включены пьезометры, размещенные на передней панели. Соответствие номера пьезометра номеру точки отбора показано на рис. 3.1.

3.3. Порядок проведения исследований

1. Убедиться в том, что кран КР1 открыт.
2. Полностью закрыть задвижки 31-37 и кран КР7. Краны КР6 и КР8 полностью открыть.
3. Повернуть переключатель режима работы насоса Н1 в среднее положение (риска II) и включить питание насоса переключением соответствующего тумблера на блоке управления. Подождать заполнения накопительного бака, вплоть до возникновения перелива через переливной трубопровод.
4. Открыть 31 на один оборот до возникновения минимального течения через трубопровод Т1.
5. Частично закрывая кран КР6, добиться минимальной величины перелива из накопительного бака для минимизации начальных возмущений.

6. Частично открыть задвижку 38 вплоть до начала поступления красящей жидкости в трубопровод Т1.

7. При необходимости уменьшить расход воды через трубопровод Т1, прикрывая задвижку 31, добиваясь прямой струйки окрашенной жидкости.

8. Закрывать кран КР8. Измерить время Δt заполнения объема V жидкостью, поступающей в мерную емкость ЕМ1. В случае автоматического измерения контрольный объем фиксирован и составляет $V=2,7$ л. Записать значение времени в табл. 3.1.

9. Зарисовать вид подкрашенной струйки в потоке в соответствующую графу табл. 3.1.

Т а б л и ц а 3.1

Определение режима движения жидкости

№ опыта	Объём V , л	Время Δt , с	Расход Q , $\text{см}^3/\text{с}$	Средняя ско- рость v , $\text{см}/\text{с}$	Число Рей- нольдса Re	Внешний вид струйки	Характер движения жидкости
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2,7	120	22,5	12,7	1905	-----	Ламин.
2							
3							
4							

Во время опытов отмечают момент перехода ламинарного режима в турбулентный по поведению окрашенной струйки. В случае развитого турбулентного движения струйка окрашенной жидкости, вводимая в поток, полностью размывается, и вся жидкость в трубке оказывается окрашенной.

10. Приоткрыть задвижку 31 и повторить действия, описанные в пунктах 7, 8, 9. Результаты занести в табл. 3.1 и 3.2.

11. Повторять действия по пунктам 7-9 до полного размыва струйки подкрашенной жидкости (ориентировочно провести 3-4 опыта).

12. При использовании ручного метода измерения времени заполнения объема V открыть кран КР8, слить жидкость из мерной емкости. Обнулить показания электронного секундомера.

13. Повернуть переключатель прибора для измерения времени в положение «Секундомер с ручным управлением». Измерить время Δt заполнения объема V жидкостью, поступающей в мерную емкость ЕМ1, используя ручной запуск электронного секундомера. В этом случае объем V в опыте определяют по разности отсчетов на шкале объемов, закрепленной на поверхности мерного бака. Отсчёты занести в табл. 3.2.

Т а б л и ц а 3.2

Определение расхода жидкости

Способ измерения времени	Объемы			Время Δt , с	Расход Q , л/с
	V_1 , л	V_2 , л	V_3 , л		
Автоматический					
Ручной					

14. Закрыть задвижку 38.
15. Закрыть задвижку 31.
16. Выключить питание насоса Н1.

3.4. Обработка опытных данных

1. Рассчитывается величина расхода воды Q , см³/с:

$$Q = 10^3 \cdot V / \Delta t. \quad (3.5)$$

При определении расхода в формуле (3.5) учтено соотношение единиц измерения объема: 1 л = 10³ см³. Это сделано из-за того, что шкала мерного бака градуирована в литрах, а дальнейшие расчеты удобнее вести в кубических сантиметрах.

В случае автоматического измерения контрольный объем фиксирован и составляет $V = 2,7$ л. При ручном методе измерения времени заполнения объема Δt объем V в опыте определяют по разности отсчетов на шкале объемов, закрепленной на поверхности мерного бака:

$$V = V_2 - V_1, \quad (3.6)$$

где V_1 и V_2 – отсчеты по шкале объемов соответственно в начале и конце измерения, л.

2. По величине расхода определяется средняя скорость движения воды в стеклянной трубке, см/с:

$$v = Q / \omega, \quad (3.7)$$

где ω – площадь поперечного сечения стеклянной трубки,

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4};$$

здесь d – диаметр стеклянной трубки. Для $d = 1,5$ см $\omega = 1,77$ см².

3. Кинематический коэффициент вязкости воды вычисляется по формуле Пуазейля в зависимости от температуры воды t :

$$\nu = \frac{0,01778}{1 + 0,0337t + 0,000221(t)^2}, \text{ см}^2/\text{с}. \quad (3.8)$$

При $t=20$ °С величину ν можно принять $\nu = 0,01$ см²/с.

4. Определяются числа Рейнольдса для различных расходов по формуле (3.3) и устанавливается характер движения жидкости.

Вопросы для самопроверки

1. Опишите характер движения частиц жидкости при ламинарном и турбулентном режимах течения.

2. Какой численный критерий существует для характеристики режима движения? Какова его размерность? Какой характерный линейный размер используют при вычислении этого критерия для напорного и безнапорного движения жидкости в круглых трубах?

3. Какое из свойств жидкости влияет на характер движения? Как это свойство учитывается в опытах?

4. Как изменяется кинематический коэффициент вязкости капельной жидкости с повышением температуры?

5. Какое явление наблюдается при росте числа Рейнольдса до верхнего критического значения?

6. Чему равно нижнее критическое число Рейнольдса при движении в круглом напорном трубопроводе?

Лабораторная работа №4. ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ ТРУБЫ

Целью работы является:

- экспериментальное определение потерь напора по длине в простом трубопроводе;
- построение его напорной характеристики;
- получение экспериментального значения коэффициента гидравлического трения;
- сравнение полученных значений с расчетными при ламинарном и турбулентном режимах течения.

4.1. Теоретические основы исследования

При движении реальной жидкости возникают силы трения, на преодоление которых затрачивается часть энергии, содержащейся в движущейся жидкости. Анализ перераспределения энергии в процессе движения жидкости в механике жидкости осуществляют с помощью закона сохранения энергии, записанного в гидродинамической форме, – уравнения Д.Бернулли.

Возьмем два сечения на некотором участке потока (рис. 4.1); энергия, затраченная на преодоление сопротивления по длине между ними, может быть определена как разность полных удельных энергий в этих сечениях.

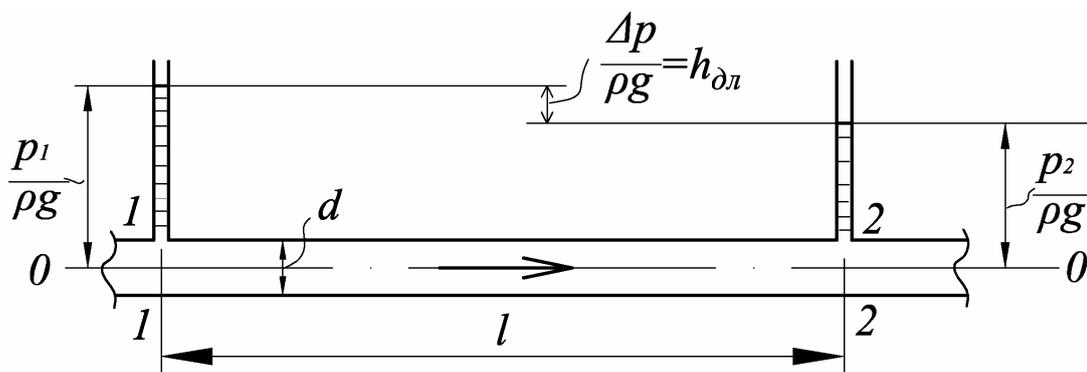


Рис. 4.1. Расчетная схема напорного движения жидкости в круглой трубе постоянного диаметра

Составим уравнение Бернулли для сечений I-I и II-II относительно горизонтальной плоскости сравнения 0-0, проходящей по оси трубы (см. рис. 4.1):

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{дл}, \quad (4.1)$$

где z_1 и z_2 – геометрические напоры в сечениях I-I и II-II, которые равны расстоянию от плоскости сравнения до характерной точки сечения (при напорном движении в трубах – до оси трубы). В данном случае $z_1 = z_2 = 0$, так как для горизонтального трубопровода плоскость сравнения проходит через центры тяжести сечений;

$\frac{P_1}{\rho \cdot g}, \frac{P_2}{\rho \cdot g}$ – удельные энергии давления (пьезометрические напоры) в сечениях I-I и II-II, равные расстояниям от центров тяжести сечений до уровней воды в пьезометрах;

$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}, \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}$ – скоростные напоры в сечениях I-I и II-II;

α_1, α_2 – коэффициенты кинетической энергии (коэффициенты Кориолиса), для турбулентного движения часто принимают $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha = 1$, для ламинарного движения α значительно больше;

$h_{\text{дл}}$ – потери напора по длине между сечениями I-I и II-II.

Поскольку участок трубопровода между сечениями I-I и II-II имеет постоянный диаметр d , то средние скорости в сечениях I-I и II-II одинаковы, то есть $v_1 = v_2$, поэтому скоростные напоры также равны между собой

$$\frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_2^2}{2g},$$

а потери напора $h_{\text{ол}}$, как видно из уравнения (4.1), будут равны разности показаний пьезометров, то есть

$$h_{\text{дл}} = \frac{P_1}{\rho \cdot g} - \frac{P_2}{\rho \cdot g}. \quad (4.2)$$

Известно, что потери по длине на трение можно определить по формулам Дарси – Вейсбаха:

$$h_{\text{дл}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = \xi \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (4.3)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения;

ξ – коэффициент сопротивления трубопровода,

$$\xi = \lambda \cdot \frac{l}{d}; \quad (4.4)$$

здесь l – длина расчетного участка;

d – диаметр трубопровода;

$\frac{v^2}{2g}$ – скоростной напор.

По зависимостям (4.3) и (4.4) находят экспериментальные величины коэффициентов сопротивления трубопровода ζ_3 и гидравлического трения λ_3 :

$$\xi_3 = \frac{h_{\text{дл}}}{v^2 / 2g}, \quad (4.5)$$

$$\lambda_3 = \frac{h_{\text{дл}}}{(l/d) \cdot v^2 / (2g)} = \frac{\xi_3}{l/d}. \quad (4.6)$$

В ходе экспериментальных работ по изучению гидравлических сопротивлений в трубах и лотках с искусственной шероховатостью стенок, проведенных И.Никурадзе (рис. 4.2), было установлено, что коэффициент гидравлического трения λ зависит в общем случае от числа Рейнольдса Re , относительной шероховатости Δ/d (Δ – высота выступов шероховатости на внутренней стенке трубы диаметром d) или относительной гладкости d/Δ . По характеру и степени влияния этих факторов различают области гидравлически гладких и гидравлически шероховатых труб.

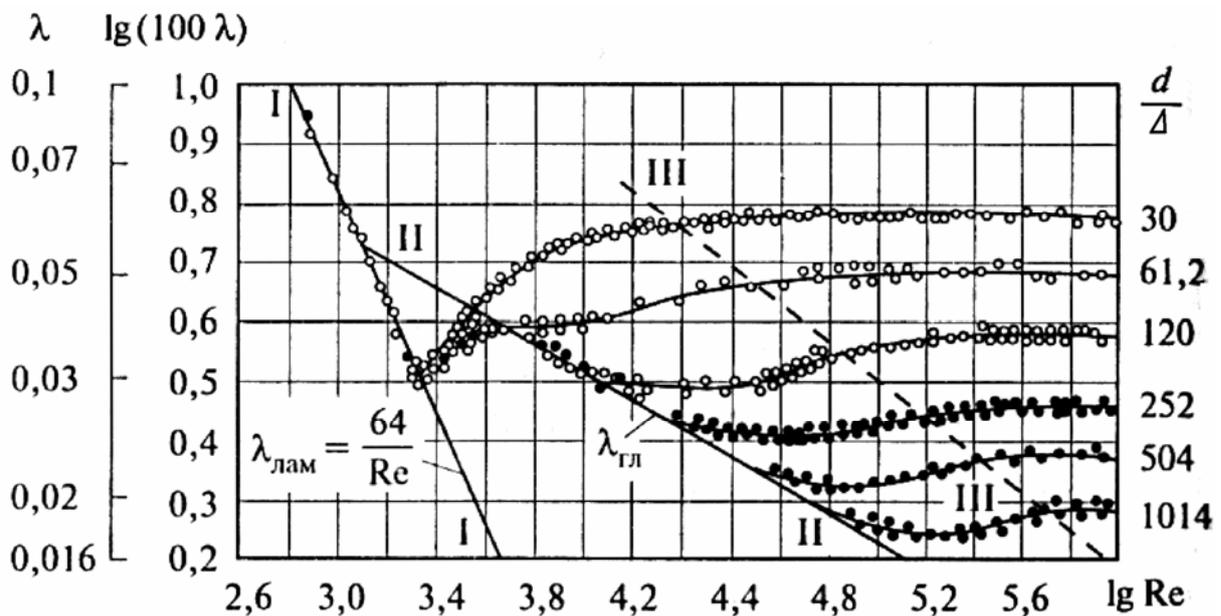


Рис. 4.2. Графики И. Никурадзе:
 линия I – зона ламинарных сопротивлений; линия II – зона действия закона Блазиуса; область между линиями II-III – зона доквадратичных сопротивлений; область правее линии III – зона квадратичных сопротивлений (автомодельности по Re)

При турбулентном режиме скорость движения жидкости в круглой трубе изменяется от нуля у стенок трубы до максимального значения на её оси (рис. 4.3).

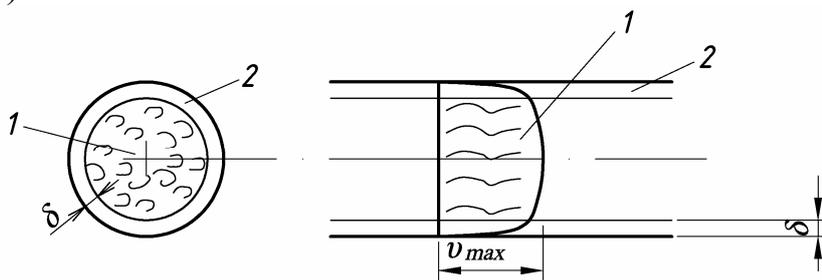


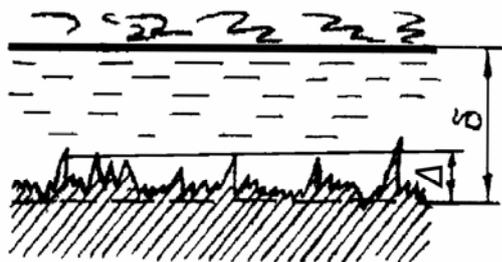
Рис. 4.3. Двухслойная модель турбулентного движения:
1 – турбулентное ядро; 2 – ламинарный пристенный слой

При этом даже при средних скоростях движения в трубе, значительно превышающих критические скорости, в пристенной области будет существовать ламинарный пограничный слой. Толщина этого слоя δ уменьшается с ростом скорости движения жидкости и определяется по формуле

$$\delta = \frac{30d}{Re\sqrt{\lambda}}. \quad (4.7)$$

В области гидравлически гладких труб средняя высота выступов шероховатости Δ значительно меньше толщины ламинарного пограничного слоя (рис. 4.4, а). При этом выступы шероховатости плавно обтекаются ламинарным потоком с малыми скоростями и не оказывают влияния на потери напора по длине потока.

а



б



Рис. 4.4. Гидравлически гладкая (а) и гидравлически шероховатая (б) трубы

Имеется ряд эмпирических формул для вычисления коэффициента λ для зон с ламинарным движением и гидравлически гладких труб. Например:

1. Для зоны ламинарного движения при Re до 2300 формула Стокса (прямая I на рис. 4.1)

$$\lambda = 64/Re. \quad (4.8)$$

2. Для зоны гидравлически гладких труб при Re от 10^3 до 10^5 используется формула Г. Блазиуса (прямая II на рис. 4.1)

$$\lambda = (100 Re)^{-0,25} = 0,3164 / Re^{0,25}. \quad (4.9)$$

Верхней границей области гидравлически гладких труб принято считать $Re = (20 \cdot d / \Delta)$.

В переходной области (рис. 4.2, зона между линиями II- III) высота выступов шероховатости Δ сопоставима с толщиной ламинарного пограничного слоя δ . Обтекание выступов шероховатости сопровождается образованием и отрывом вихрей. При этом числа Рейнольдса, как правило, более 100 тысяч, а коэффициент λ можно вычислять по формуле А.Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (4.10)$$

Область гидравлически шероховатых труб, соответствующую числам Рейнольдса $Re > (500 \cdot d / \Delta)$ (рис. 4.2, зона правее линии III), принято называть зоной квадратичных сопротивлений. Здесь выступы шероховатости значительно превышают толщину ламинарной пленки у стенок трубы (см. рис. 4.4, б). Коэффициент λ в этой зоне определяют по формуле Б.Л. Шифринсона

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}. \quad (4.11)$$

На графиках И. Никурадзе (см. рис.4.2) эта зона представлена параллельными оси $\lg Re$ линиями, поэтому ее часто называют зоной автономности (независимости) по Re .

4.2. Описание экспериментальной установки

Работа по определению коэффициента гидравлического трения проводится на лабораторном стенде, схема которого приведена на рис. 3.1.

Учебный стенд состоит из центробежного насоса Н1, основного и накопительного баков, запорной арматуры, измерительных приборов и устройств, соединительных и исследуемых трубопроводов, размещенных на сварной раме и поддонах.

Вода центробежным насосом Н1 по соединительным трубопроводам из бака Б1 нагнетается в накопительный бак Б2, из которого под постоянным напором подается к исследуемым трубопроводам Т1, Т2. Они выполнены из прозрачных гладких труб длиной $L=100$ см и, соответственно, с внутренним диаметром $d_1 = 15$ мм и $d_2 = 10$ мм.

Расходы жидкости через элементы стенда измеряются объемным способом – с помощью мерной емкости ЕМ1, время наполнения которой может определяться по электронному секундомеру при замыкании поплавочных датчиков. Также расход может быть определен путем визуального замера объема по шкале, расположенной на мерной емкости, и времени его наполнения, замеренного с помощью запускаемого вручную секундомера.

Для замера перепадов пьезометрических напоров $h_{п}$ на участках трубопроводов в состав стенда включены пьезометры, размещенные на передней панели П1...П4. Места их подключения показаны на схеме (см. рис 3.1) соответствующими цифрами: (1)... (4).

4.3. Порядок проведения работы

1. Открыть задвижку КР8.
2. Залить бак Б1 водой.
3. Открыть задвижки КР1 и КР6.
4. Включить насос Н1. Установить максимальный уровень воды в баке Б2.
5. Вращая рукоятку задвижки З1, установить уровень жидкости в пьезометре № 1 ($h_{п1}$) на отметке 90 см.
6. Записать в табл. 4.1 показания пьезометра № 2, подключенного в конце трубопровода Т1 ($h_{п2}$).
7. Закрыть сбросной кран мерной ёмкости КР8. Измерить время Δt заполнения объема V жидкостью, поступающей в мерную емкость. Записать значение в табл. 4.1. Слить воду из мерной ёмкости, открыв кран КР8.
8. Повторив действия по пунктам 5, 6 и 7 выполнить замеры для диапазона $h_{п1}$ 90-75 см с интервалом 2,5 см .
9. Закрыть задвижку З1.
10. Аналогичные замеры провести при исследовании трубопровода Т2. Для этого необходимо, поворачивая рукоятку задвижки З2, установить уровень жидкости в пьезометре №3 ($h_{п3}$) на отметке 90 см. Записать в табл. 4.2 показания пьезометра № 4, подключенного в конце трубопровода Т2 ($h_{п4}$).
11. Закрыть сбросной кран КР8 мерной ёмкости. Измерить время Δt заполнения объема V жидкостью, поступающей в мерную емкость ЕМ1. Записать значение в табл. 4.2. Слить воду из мерной ёмкости, открыв кран КР8.
12. Повторив действия по пунктам 10 и 11, выполнить замеры для диапазона $h_{п3}$ 90-75 см с интервалом 2,5 см (в табл. 4.1 – строка 4).
13. Закрыть задвижку З2.
14. Выключить питание насоса Н1.

Таблица 4.1

Гидравлические исследования трубопровода Г1 диаметром $d_1 = 15$ мм, длиной $L=100$ см при внутренней шероховатости $\Delta=0,01$ мм

№ опыта	0 (пример)	1	2	3	4	5	6	7
1. Объём воды в мерном баке V , л	2,7							
2. Время наполнения объёма Δt , с	15,2							
3. Расход воды Q , см ³ /с	177,0							
4. Пьезометрический напор в начале Г1 $h_{п1}$, см	100	90,0	87,5	85,0	82,5	80,0	77,5	75,0
5. Пьезометрический напор в конце Г1 $h_{п2}$, см	90							
6. Потери напора в Г1 $h_{п2}$, см	10							
7. Средняя скорость v , см/с	100							
8. Скоростной напор $v^2 / 2g$, см	5,1							
9. Число Рейнольдса Re	15000							
10. Опытный коэффициент сопротивления ζ_0	1,96							
11. Опытный коэффициент гидравлического трения λ_0	0,02941							
12. Теоретический коэффициент гидравлического трения λ_T	0,02949							
13. Относительная ошибка определения коэффициента гидравлического трения λ , $\Delta \lambda_{отн}$, %	0,27 %							

Таблица 4.2

Гидравлические исследования трубопровода Т2 диаметром $d_2 = 10$ мм, длиной $L=100$ см при внутренней шероховатости $\Delta=0,01$ мм

№ опыта	0 (пример)	1	2	3	4	5	6	7
1. Объём воды в мерном баке V , л								
2. Время наполнения объёма Δt , с								
3. Расход воды Q , см ³ /с								
4. Пьезометрический напор в начале Т2 $h_{п3}$, см		90,0	87,5	85,0	82,5	80,0	77,5	75,0
5. Пьезометрический напор в конце Т2 $h_{п4}$, см								
6. Потери напора в Т2 h_{34} , см								
7. Средняя скорость v , см/с								
8. Скоростной напор $v^2 / 2g$, см								
9. Число Рейнольдса Re								
10. Опытный коэффициент сопротивления ζ_3								
11. Опытный коэффициент гидравлического трения λ_3								
12. Теоретический коэффициент гидравлического трения, λ_T								
13. Относительная ошибка определения коэффициента гидравлического трения λ , $\Delta \lambda_{отн}$, %								

4.4. Обработка опытных данных

1. Вычисляем расход воды в трубе по выражению (3.5).
2. Определяем потери напора по длине трубопровода. Так как оси исследуемых трубопроводов горизонтальны, их диаметры постоянны, а расходы воды между замерами неизменны, потери напора на участках между сечениями 1-2 и 3-4 будут определяться соответственно разностью пьезометрических напоров, т.е. разностью показаний пьезометров (см. рис. 3.1):

$$h_{12} = h_{П1} - h_{П2}; \quad h_{34} = h_{П3} - h_{П4}. \quad (4.12)$$

3. Среднюю скорость движения воды в трубе вычисляем по (3.7), учитывая, что на исследуемых участках трубы имеют диаметры $d_1 = 15$ мм и $d_2 = 10$ мм, а площадь поперечного сечения труб соответственно $\omega_1 = 1,77$ см² и $\omega_2 = 0,78$ см².

4. Определяем скоростной напор $H_{ск}$ при ускорении свободного падения $g = 9,81$ м/с² = 981 см/с² и коэффициенте Кориолиса $\alpha=1$:

$$H_{ск} = \frac{v^2}{2g}. \quad (4.13)$$

5. Из формулы Дарси – Вейсбаха находим экспериментальную величину коэффициента сопротивления трубопровода $\zeta_э$ по (4.5):

$$\zeta_э = \frac{h_{дп}}{H_{ск}}. \quad (4.14)$$

6. Подсчитываем значение опытного коэффициента гидравлического трения $\lambda_э$ по зависимости (4.6).

7. Коэффициент кинематической вязкости воды принимаем для 20⁰С $\nu = 0,01$ см²/с.

8. Вычисляем число Рейнольдса Re по выражению (3.3), на основании которого оцениваем режим движения жидкости (ламинарный или турбулентный), гидравлические особенности трубы в условиях движения воды (гидравлически гладкие или шероховатые трубы), зону гидравлического трения (ламинарных, доквадратичных или квадратичных сопротивлений).

9. Рассчитываем теоретическую величину коэффициента гидравлического трения $\lambda_т$ для ламинарного режима по формуле Стокса (4.8), а для турбулентного – по формуле Г.Блазиуса (4.9) для гидравлически гладких труб, а для переходной области и зоны гидравлически шероховатых труб – по формулам А.Д. Альтшуля (4.10) или Б.Л. Шифринсона (4.11), приняв среднюю шероховатость исследуемых труб $\Delta=0,01$ мм.

10. Определяем относительную ошибку опыта:

$$\Delta\lambda_{\text{отн}} = \frac{\lambda_{\text{оп}} - \lambda_{\text{т}}}{\lambda_{\text{т}}} 100\%. \quad (4.15)$$

11. В разделе НИРС рекомендуется построить характеристики трубопроводов в координатах $Q-h_{\text{дл}}$ (расход – потери напора) (рис. 4.5). Сделать выводы.

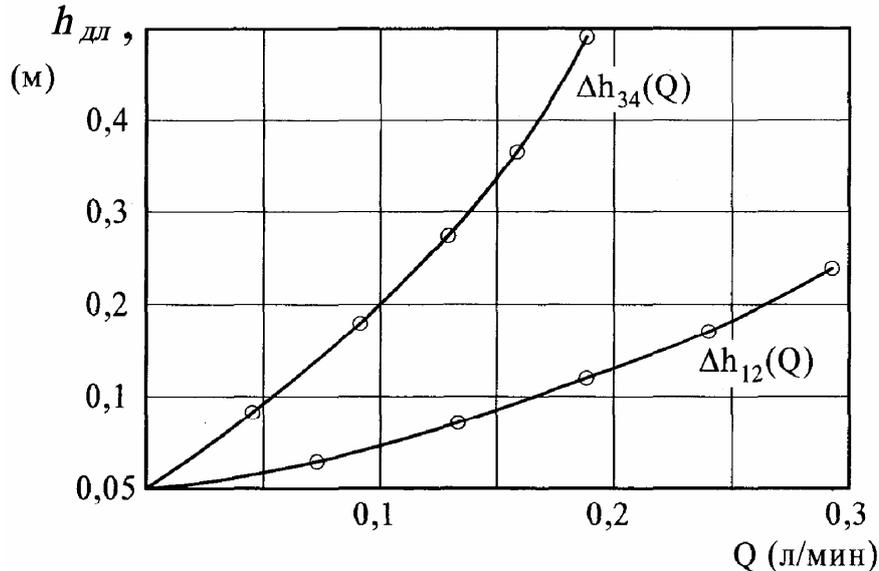


Рис. 4.5. Пример построения экспериментальных характеристик простых трубопроводов

Вопросы для самопроверки

1. Какой закон в гидродинамической форме выражает уравнение Бернулли?
2. Какой геометрический и энергетический смысл имеют члены уравнения Бернулли?
3. Как определить опытным путем потери напора по длине трубопровода?
4. Как опытным путем определить коэффициент гидравлического трения?
5. Где возникает ламинарный пограничный слой? Как изменяется его толщина при увеличении средней скорости потока?
6. Какие трубы называют гидравлически гладкими? От чего в таких трубах зависит коэффициент гидравлического трения?
7. Чем обусловлен коэффициент гидравлического трения в гидравлически шероховатых трубах?

Лабораторная работа №5.
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТНЫХ ПОТЕРЬ НАПОРА
В КЛИНОВОЙ ЗАДВИЖКЕ И МЕРНОЙ ДИАФРАГМЕ

Цель работы – определить экспериментальным путем величины коэффициентов местных сопротивлений для клиновой задвижки и диафрагмы.

5.1. Теоретические основы исследования

Местная потеря напора представляет собой часть полной удельной энергии потока, переходящую в тепло (и рассеивающуюся) благодаря работе сил трения, сосредоточенных на участке потока небольшой длины. На этом участке поток претерпевает ту или иную местную деформацию, приводящую к изменению величины или направления скорости движения жидкости – при движении потока через запорно-регулирующую арматуру (диафрагмы, задвижки, клапаны) и фасонные части трубопровода (их устанавливают при повороте потока, при его расширении или сужении и т.д.).

Потери напора, затраченного на преодоление какого-либо местного сопротивления, оцениваются в долях скоростного напора, соответствующего скорости непосредственно за рассматриваемым местным сопротивлением, и определяются по формуле Вейсбаха:

$$h_m = \xi_m \frac{v_2^2}{2g}, \quad (5.1)$$

где ξ_m – коэффициент местного сопротивления, зависящий в общем случае от вида местного сопротивления и от числа Рейнольдса;

v_2 – средняя скорость движения жидкости в трубе на участке за местным сопротивлением.

Коэффициенты разных сопротивлений устанавливают, как правило, опытным путем. Для этого необходимо экспериментально найти фактическую величину местных потерь напора h_m при данном расходе воды в трубе, а величину коэффициентов местных сопротивлений можно определить из формулы Вейсбаха:

$$\xi_m = \frac{h_m}{v_2^2/2g}. \quad (5.2)$$

Для определения местной потери напора h_m составляют уравнение Бернулли для сечения I-I, взятого перед местным сопротивлением, и сечения II-II, взятого за местным сопротивлением, в местах установки пьезометров. Следует подчеркнуть, что сечения I-I и II-II выбирают с

таким расчетом, чтобы местное сопротивление не влияло на распределение скоростей в этих сечениях, то есть чтобы в них наблюдались условия плавно изменяющегося движения.

Местная потеря напора в общем случае, в соответствии с уравнением Бернулли, будет равна разности полных удельных энергий потока в сечениях перед местным сопротивлением и за ним:

$$h_m = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} \right). \quad (5.3)$$

Для турбулентного движения коэффициент кинетической энергии α принимается равным единице ($\alpha_1 = \alpha_2 = 1$).

Если местные сопротивления расположены на горизонтальном участке трубопровода постоянного диаметра ($d_{тр} = \text{const}$), то в этих случаях координаты центров тяжести и средние скорости живых сечений равны между собой: $z_1 = z_2$, $v_1 = v_2$; следовательно, потери напора будут равны разности показаний пьезометров, установленных по обе стороны данного местного сопротивления:

$$h_m = \frac{p_1}{\rho \cdot g} - \frac{p_2}{\rho \cdot g}. \quad (5.4)$$

Примером местных сопротивлений при $d_{тр} = \text{const}$ на лабораторном стенде для гидродинамических исследований (см. рис. 3.1) могут служить диафрагма и клиновидная задвижка.

Диафрагма (рис. 5.1) устанавливается на трубопроводе для пропуска фиксированного расхода воды в определённом месте, поэтому её часто называют мерной. Расход Q , проходящий через мерную диафрагму с отверстием диаметром d_o , вычисляют по формуле

$$Q = \mu \cdot \omega_0 \sqrt{2gh_{\text{диаф}}}, \quad (5.5)$$

где μ – коэффициент расхода диафрагмы;

ω_0 – площадь отверстия диафрагмы диаметром d_o ;

$h_{\text{диаф}}$ – потери напора в диафрагме.

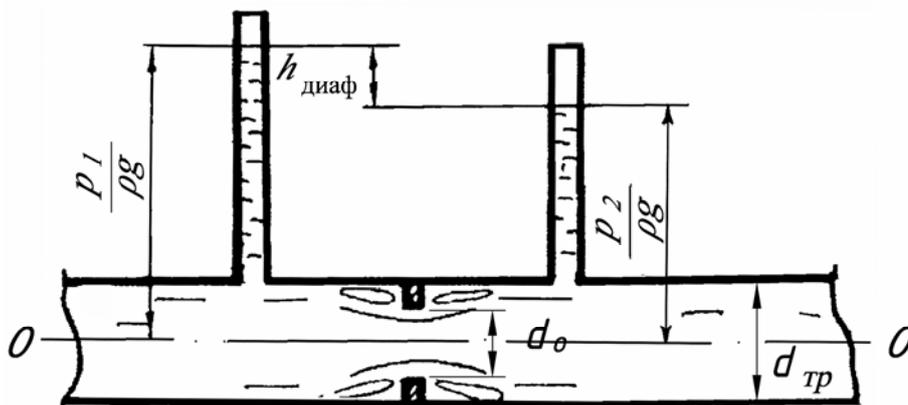


Рис. 5.1. Схема движения жидкости через диафрагму

Коэффициент расхода μ мерной диафрагмы определяют опытным путем при ее тарировке по формуле

$$\mu = \frac{Q}{\omega_0 \sqrt{2g \cdot h_{\text{диаф}}}}. \quad (5.6)$$

Коэффициент местного сопротивления диафрагмы можно рассчитать по эмпирической формуле

$$\xi_{\text{диаф}} = \left(\frac{1}{n \cdot \varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (5.7)$$

где n – отношение площади отверстия диафрагмы ω_0 диаметром d_0 к площади поперечного сечения трубы ω диаметром $d_{\text{тр}}$,

$$n = \frac{\omega_0}{\omega} = \frac{d_0^2}{d_{\text{тр}}^2}; \quad (5.8)$$

ε – коэффициент сжатия при прохождении потока через отверстие диафрагмы, который можно определить по формуле А.Альтшуля:

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{0,1 - n}. \quad (5.9)$$

Задвижки, вентили и краны, используемые для регулирования расхода воды на трубопроводах различных диаметров, имеют многочисленные конструктивные решения. Их пропускная способность зависит либо от линейных, либо от угловых показателей степени открытия проходного отверстия запорно-регулирующего устройства.

Рассмотрим возможность регулирования расхода воды на примере устройства клиновой задвижки (рис. 5.2). При вращении маховика (штурвала) 1 перемещается шток 2 задвижки, на конце которого закреплён клиновидный элемент 4. Этот элемент в различных положениях способен регулировать степень открытия проточной части задвижки.

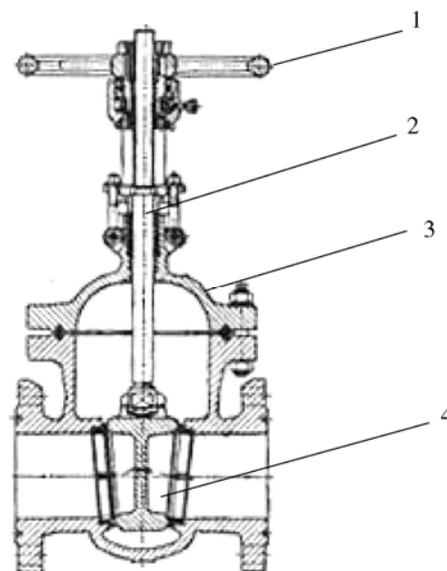


Рис. 5.2. Схема клиновой задвижки:
1 – маховик, 2 – шток,
3 – корпус, 4 – клин

5.2. Описание экспериментальной установки

Исследование местных потерь напора производится на учебном стенде по гидродинамическим исследованиям, который использовался в лабораторных работах № 3 и 4 (см. рис. 3.1). Принцип действия стенда описан в работе № 4.

Местные сопротивления включены в трубопровод Т4.

Исследуемая клиновидная задвижка 33 переменного сечения установлена на участке трубы диаметром $d_{\text{тр}} = 16$ мм. Точки замера пьезометрического напора № 8 и № 9 у задвижки 33 расположены во входном и выходном фитингах с тем же условным проходом $d_{\text{тр}} = 16$ мм.

Мерная диафрагма установлена на участке трубопровода с внутренним диаметром $d_{\text{тр}} = 26$ мм. Диаметр отверстия диафрагмы составляет $d_0 = 5$ мм. Для определения пьезометрических напоров перед диафрагмой и после неё используются соответственно пьезометры № 10 и № 11.

5.3. Порядок проведения работы

А) Исследование диафрагмы:

1. Производится подготовка насоса Н1 к включению.
2. Кран КР1 на всасывающей линии насоса Н1 открыт.
3. Задвижки 31, 32, 33, 34, 36 и 37 на трубопроводах Т1-Т4 закрыты.
4. Краны КР6 и КР8 полностью открыты.
5. Установив переключатель насоса Н1 в среднее положение, лаборант включает насос.
6. Накопительный бак заполняется вплоть до возникновения перелива через переливной трубопровод.
7. Вращая рукоятку задвижки 34, устанавливают уровень жидкости в пьезометре № 10 ($h_{\text{П10}}$) на отметке 90 см.
8. Вносят в табл. 5.1 показания пьезометра № 11, подключенного в сечении, расположенном после диафрагмы ($h_{\text{П11}}$).
9. Закрывают сбросной кран КР8 мерной ёмкости. Измеряют время Δt заполнения объема V жидкостью, поступающей в мерную ёмкость ЕМ1. Вносят значения в табл. 5.1. Сливают воду из мерной ёмкости, открыв кран КР8.
10. Повторяя действия по пунктам 6, 7 и 8, выполняют замеры для диапазона $h_{\text{П10}}$ 85-45 см с интервалом 5 см.
11. Закрывают задвижку 34.

Таблица 5.1

Исследование мерной диафрагмы

Параметры	Уровень воды в пьезометре № 10 $h_{П10}$, см									
	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45
Объём воды в мерном баке V , л										
Время наполнения объёма Δt , с										
Расход воды Q , см ³ /с										
Уровень воды в пьезометре № 11 $h_{П11}$, см										
1. Потеря напора в диафрагме $h_{\text{диаф}}$, см										
2. Коэффициент расхода диафрагмы μ										
3. Средняя скорость в трубопроводе $v_{\text{тр}}$, см/с										
4. Скоростной напор в трубопроводе $v_{\text{тр}}^2 / 2g$, см										
5. Число Рейнольдса для потока в трубопроводе $Re_{\text{тр}}$										
6. Коэффициент сопротивления диафрагмы, приведённый к скоростному напору в трубопроводе $\xi_{\text{диафр}}$										

Таблица 5.2

Исследования задвижки при открытии на один оборот

Параметры	Высота воды в пьезометре №8 $h_{П8}$, см					
	80	70	60	50	40	30
1. Объем воды в мерном баке V , л						
2. Время наполнения объема Δt , с						
3. Расход воды Q , см ³ /с						
4. Уровень воды в пьезометре № 9 $h_{П9}$, см						
5. Потери напора в задвижке $h_{здв}$, см						
6. Средняя скорость в трубопроводе $v_{тр}$, см/с						
7. Скоростной напор в трубопроводе $v_{тр}^2 / 2g$, см						
8. Число Рейнольдса для потока в трубопроводе $Re_{тр}$						
9. Коэффициент сопротивления задвижки $\xi_{здв}$						

Б) Исследование клиновой задвижки:

1. Полностью открывают задвижку 37. Исследуемую задвижку 33 открывают на один оборот.

2. Регулируя задвижкой 37, устанавливают уровень жидкости в пьезометре № 8 на отметке 80 см.

3. Закрывают сбросной кран КР8 мерной ёмкости. Измеряют время Δt заполнения объема V жидкостью, поступающей в мерную ёмкость ЕМ1. Вносят значения в табл. 5.2. Сливают воду из мерной ёмкости, открыв кран КР8.

4. Записывают в табл. 5.2 показания пьезометра № 9 ($h_{П9}$).

5. Повторяя действия по пунктам 12, 13 и 14, выполняют замеры для диапазона $h_{П8}$ 70-30 см с интервалом 10 см.

6. Исследуемую задвижку 33 открывают еще на один оборот.

7. Повторяя действия по пунктам 12, 13, 14 и 15, выполняют замеры для диапазона $h_{П8}$ 80-30 см с интервалом 10 см. Вносят значение измеренных величин в табл. 5.3 и 5.4.

8. Закрывают задвижку 37.

9. Выключают питание насоса Н1.

Т а б л и ц а 5.3

Исследования задвижки при открытии на два оборота

Параметры	Высота воды в пьезометре № 8 $h_{П8}$, см					
	80	70	60	50	40	30
1. Объём воды в мерном баке V , л						
2. Время наполнения объёма Δt , с						
3. Расход воды Q , см ³ /с						
4. Уровень воды в пьезометре № 9 $h_{П9}$, см						
5. Потери напора в задвижке $h_{зdv}$, см						
6. Средняя скорость в трубопроводе $v_{тр}$, см/с						
7. Скоростной напор в трубопроводе $v_{тр}^2 / 2g$, см						
8. Число Рейнольдса для потока в трубопроводе $Re_{тр}$						
9. Коэффициент сопротивления задвижки $\xi_{зdv}$						

Т а б л и ц а 5.4

Исследования задвижки при открытии на три оборота

Параметры	Высота воды в пьезометре № 8 $h_{П8}$, см					
	80	70	60	50	40	30
1. Объём воды в мерном баке V , л						
2. Время наполнения объёма Δt , с						
3. Расход воды Q , см ³ /с						
4. Уровень воды в пьезометре № 9 $h_{П9}$, см						
5. Потери напора в задвижке $h_{зdv}$, см						
6. Средняя скорость в трубопроводе $v_{тр}$, см/с						
7. Скоростной напор в трубопроводе $v_{тр}^2 / 2g$, см						
8. Число Рейнольдса для потока в трубопроводе $Re_{тр}$						
9. Коэффициент сопротивления задвижки $\xi_{зdv}$						

5.4. Обработка опытных данных

А) Исследование диафрагмы

1. Определяем расход воды в трубе Q , $\text{см}^3/\text{с}$, по выражению (3.5).

2. Находим местные потери напора в диафрагме по отметкам воды в пьезометрах № 10 и № 11:

$$h_{\text{диаф}} = h_{\text{П10}} - h_{\text{П11}}. \quad (5.10)$$

3. Вычисляем коэффициент расхода диафрагмы μ по формуле при $d_{\text{отв}} = 0,5 \text{ см}$ и $\omega_0 = 0,2 \text{ см}^2$:

$$\mu = \frac{Q}{\omega_0 \sqrt{2g \cdot h_{\text{диаф}}}}. \quad (5.11)$$

4. Рассчитываем параметры потока в трубопроводе диаметром $d_{\text{тр}} = 2,6 \text{ см}$:

4.1. среднюю скорость жидкости $v_{\text{тр}}$, $\text{см}/\text{с}$ по формуле (3.7) при $\omega_{\text{тр}} = 5,31 \text{ см}^2$;

4.2. скоростной напор $v_{\text{тр}}^2 / 2g$ при ускорении свободного падения $g = 981 \text{ см}/\text{с}^2$;

4.3. критерий Рейнольдса $Re_{\text{тр}} = \frac{v_{\text{тр}} \cdot d_{\text{тр}}}{\nu}$ при кинематическом коэффициенте вязкости воды $\nu = 0,01 \text{ см}^2/\text{с}$.

5. Определяем коэффициент сопротивления диафрагмы по формуле (5.2):

$$\xi_{\text{диафр}} = \frac{h_{\text{диафр}}}{\frac{v_{\text{тр}}^2}{2g}}. \quad (5.12)$$

6. Строим характеристику диафрагмы в координатах «коэффициент сопротивления – критерий Рейнольдса» $\xi_{\text{диаф}} = f(Re_{\text{тр}})$ (рис. 5.3).

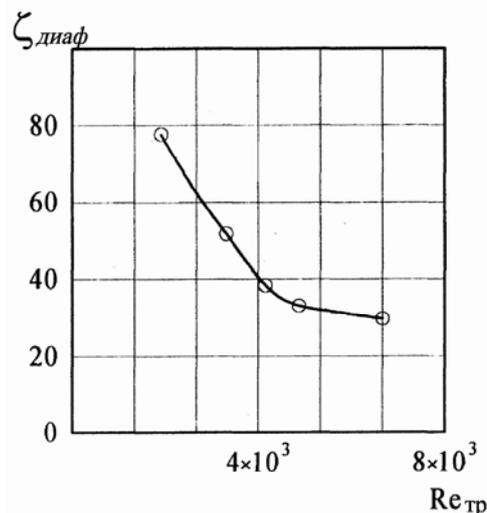


Рис. 5.3. Пример построения эмпирической характеристики диафрагмы

Б) Исследование клиновой задвижки:

1. Определяем расход воды в трубе Q , л/с, по выражению (3.5), используя данные из табл. 5.2.

2. Находим местные потери напора в задвижке по отметкам воды в пьезометрах № 8 и № 9:

$$h_{зdv} = h_{П8} - h_{П9}. \quad (5.13)$$

3. Рассчитываем среднюю скорость жидкости в трубопроводе, на котором установлена задвижка, $v_{тр}$, см/с, по формуле (3.7) при $\omega_{тр} = 2,01 \text{ см}^2$.

4. Вычисляем скоростной напор $v_{тр}^2 / 2g$ при ускорении свободного падения $g = 981 \text{ см/с}^2$.

Находим критерий Рейнольдса при $d_{тр} = 1,6 \text{ см}$ и кинематическом коэффициенте вязкости $\nu = 0,01 \text{ см}^2/\text{с}$:

$$Re_{тр} = v_{тр} \cdot d_{тр} / \nu.$$

5. Определяем коэффициент сопротивления задвижки:

$$\xi_{зdv} = \frac{h_{зdv}}{v_{тр}^2 / 2g}. \quad (5.14)$$

6. В качестве задания по НИР строим напорную характеристику задвижки в координатах «подача – потери напора» $h_{зdv} = f(Q)$ для трех перекрытий задвижки.

7. Строим характеристику задвижки в координатах «коэффициент сопротивления – критерий Рейнольдса» $\xi_{зdv} = f(Re_{тр})$ для трех перекрытий задвижки.

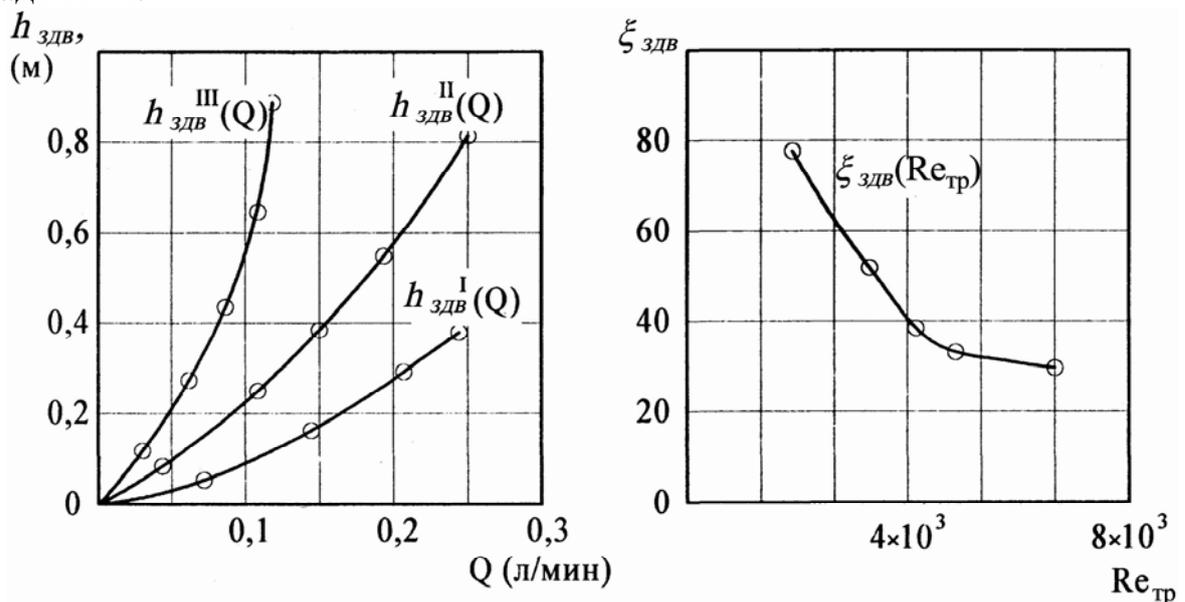


Рис. 5.4. Пример построения экспериментальных характеристик задвижки

Вопросы для самопроверки

1. Что служит причиной потерь напора в местных сопротивлениях?
2. Что можно сказать о слагаемых в левой и правой частях уравнения Бернулли при установке местных сопротивлений на трубе постоянного диаметра?
3. Почему диафрагмы с определённым диаметром отверстия называют мерными диафрагмами?

Лабораторная работа №6.
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТНЫХ ПОТЕРЬ НАПОРА
ПРИ ВНЕЗАПНОМ СУЖЕНИИ И РАСШИРЕНИИ ПОТОКА

Цель работы – определить экспериментальным путем величины коэффициентов местных сопротивлений – внезапного расширения и внезапного сужения.

6.1. Теоретические основы исследования

В соответствии с уравнением Бернулли при резком изменении диаметра трубопровода потеря удельной энергии потока (потеря напора) происходит при изменении как удельной потенциальной энергии (пьезометрического напора), так и удельной кинетической энергии (скоростного напора).

Местная потеря напора в общем случае будет равна разности полных удельных энергий потока в сечениях перед местным сопротивлением и за ним.

Если местное сопротивление расположено на горизонтальном участке трубопровода, то в этом случае $z_1 = z_2$.

В случае изменения сечения потока, в частности при внезапном расширении трубопровода (рис. 6.1), местная потеря напора между сечениями 1-1 и 2-2 выразится следующим образом:

$$h_{\text{BP}} = \left(\frac{p_1}{\rho \cdot g} - \frac{p_2}{\rho \cdot g} \right) + \left(\frac{\alpha_1 \cdot v_d^2}{2g} - \frac{\alpha_1 \cdot v_D^2}{2g} \right), \quad (6.1)$$

где v_d – средняя скорость движения жидкости в трубе меньшего диаметра d ;

v_D – средняя скорость движения жидкости в трубе большего диаметра D ;

α – коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей по живому сечению потока.

Для турбулентного движения коэффициент α принимается равным единице ($\alpha = 1$).

В случае внезапного расширения трубопровода пьезометрическая линия будет возрастать от сечения 1-1 до сечения 2-2, а линия полной удельной энергии – падать.

При внезапном сужении трубопровода (рис. 6.2) местная потеря напора h_{BC} будет равна:

$$h_{\text{BC}} = \left(\frac{p_1}{\rho \cdot g} - \frac{p_2}{\rho \cdot g} \right) + \left(\frac{\alpha_1 \cdot v_D^2}{2g} - \frac{\alpha_1 \cdot v_d^2}{2g} \right). \quad (6.2)$$

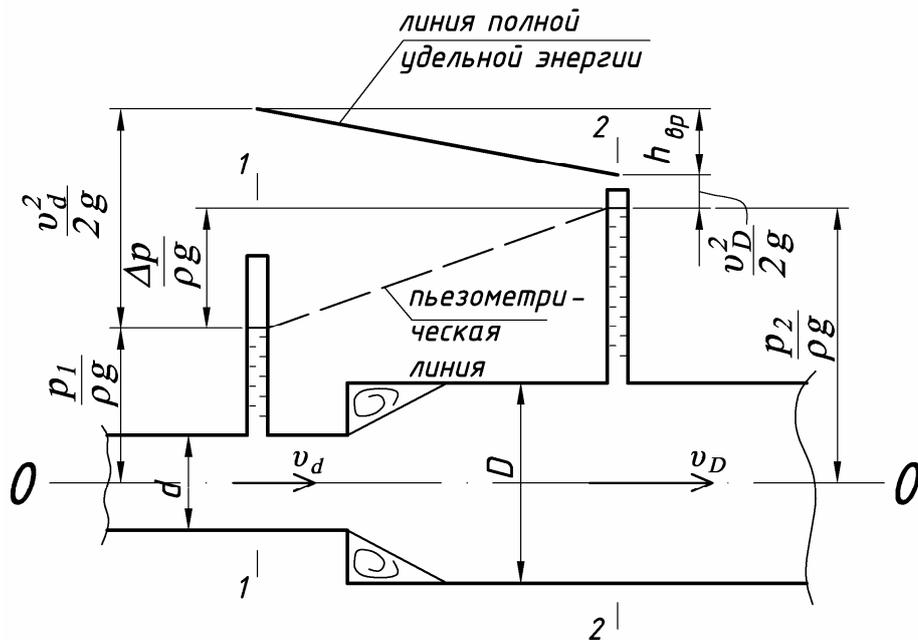


Рис. 6.1. Схема движения жидкости через внезапное расширение

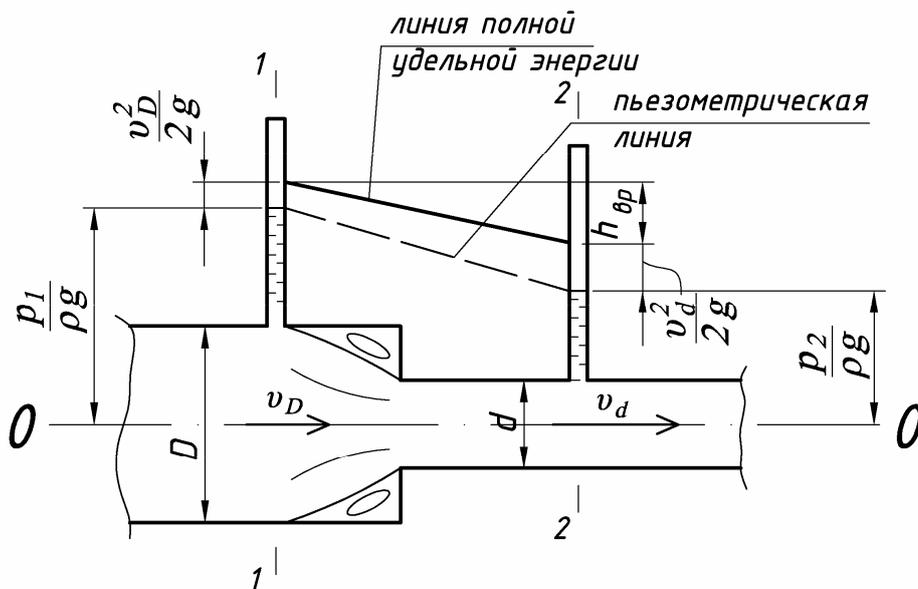


Рис. 6.2. Схема движения жидкости через внезапное сужение

Экспериментальным путем коэффициент местных сопротивлений находят из формулы Вейсбаха (5.1), определяя из опытов фактическую величину местных потерь напора h_M при данном расходе воды в трубе:

$$\zeta_M = \frac{h_M}{\frac{v_2^2}{2g}}. \quad (6.3)$$

В формуле (6.3) используется скоростной напор, определяемый в сечении, расположенном после сопротивления.

6.2. Описание экспериментальной установки

Исследование местных потерь напора производится на учебном стенде по гидродинамическим исследованиям, схема которого приведена на рис. 3.1. Исследуемые местные сопротивления включены в трубопровод Т4. Диаметр трубопровода большего диаметра составляет $D=15$ мм, меньшего диаметра – $d=10$ мм.

6.3. Порядок проведения опыта

1. Производится подготовка насоса Н1 к включению.
2. Лаборант включает установку. Накопительный бак заполняется, вплоть до возникновения перелива через переливной трубопровод.
3. Открыть задвижку З3.
4. Открыть кран КР8.
5. Вращая рукоятку задвижки 37, установить уровень жидкости в пьезометре № 5 ($h_{П5}$) на отметке 90 см.
6. Записать в табл. 6.1 показания пьезометров № 6 и № 7.
7. Закрывать кран КР8. Измерить время Δt заполнения объема V жидкостью, поступающей в мерную емкость ЕМ1. Записать значения V и Δt в табл. 6.1. Открыть кран КР8.
8. Повторить действия по пунктам 5, 6 и 7 для диапазона показаний пьезометра № 5 ($h_{П5}$) 85-60 см с интервалом 5 см или при других расходах.
9. Полностью закрыть задвижку З3.
10. Выключить питание насоса Н1.

Т а б л и ц а 6.1

Определение коэффициентов местных сопротивлений
при внезапном расширении и сужении

Параметры	Уровень воды в пьезометре № 5 $h_{П5}$, см						
	90	85	80	75	70	65	60
1	2	3	4	5	6	7	8
1. Объём воды в мерном баке V , л							
2. Время наполнения объёма Δt , с							
3. Расход воды Q , см ³ /с							
4. Уровень воды в пьезометре № 6 $h_{П6}$, см							
5. Уровень воды в пьезометре № 7 $h_{П7}$, см							
6. Средняя скорость в трубопроводе малого диаметра v_d , см/с							
7. Скоростной напор в трубопроводе малого диаметра $v_d^2 / 2g$, см							

1	2	3	4	5	6	7	8
8. Средняя скорость в трубопроводе большого диаметра v_D , см/с							
9. Скоростной напор в трубопроводе большого диаметра $v_D^2 / 2g$, см							
10. Потери напора при внезапном расширении потока $h_{вр}$, см							
11. Опытный коэффициент сопротивления – внезапного расширения $\xi_{вр}^{оп}$							
12. Относительная ошибка определения коэффициент сопротивления – внезапного расширения, %							
13. Потери напора при внезапном сужении потока $h_{вс}$, см							
14. Опытный коэффициент сопротивления – внезапного сужения $\xi_{вс}^{оп}$							
15. Относительная ошибка определения коэффициент сопротивления – внезапного сужения, %							

6.4. Обработка опытных данных

1. Определяем расход воды в трубе Q , см³/с, по выражению (3.5), используя данные измерений.

2. Для трубопроводов большого и малого диаметров ($D=1,5$ см $d=1,0$ см) вычисляем площади живых сечений:

$$\omega_D = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1,5^2}{4} = 1,77 \text{ см}^2,$$

$$\omega_d = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1,0^2}{4} = 0,785 \text{ см}^2.$$

3. Находим среднюю скорость движения жидкости v_d и v_D , учитывая площади живых сечений соответствующих трубопроводов ω_d и ω_D :

$$v_d = \frac{Q}{\omega_d}, \quad v_D = \frac{Q}{\omega_D}. \quad (6.4)$$

4. Определяем скоростной напор $H_{скd}$ и $H_{скD}$ при $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$:

$$H_{скd} = \frac{v_d^2}{2g}, \quad H_{скD} = \frac{v_D^2}{2g}, \quad (6.5)$$

где $g = 981,0$ см/с².

5. Рассчитываем местные потери напора.

На внезапном расширении потери напора по результатам исследований определим следующим образом:

$$\Delta h_{\text{BP}} = h_{\text{П5}} + H_{\text{скд}} - h_{\text{П6}} - H_{\text{скD}}. \quad (6.6)$$

На внезапном сужении они составят:

$$\Delta h_{\text{BC}} = h_{\text{П6}} + H_{\text{скD}} - h_{\text{П7}} - H_{\text{скd}}. \quad (6.7)$$

6. Опытные коэффициенты местных сопротивлений находим по формуле (6.3):

$$\xi_{\text{BP}} = \frac{h_{\text{BP}}}{H_{\text{скD}}}, \quad (6.8)$$

$$\xi_{\text{BC}} = \frac{h_{\text{BC}}}{H_{\text{скd}}}. \quad (6.9)$$

7. Теоретический коэффициент сопротивлений при внезапном расширении вычисляем по формуле

$$\xi_{\text{BP}}^{\text{T}} = \left(\frac{\omega_D}{\omega_d} - 1 \right)^2 = \left(\frac{1,77}{0,785} - 1 \right)^2 = 1,57. \quad (6.10)$$

Теоретически коэффициент сопротивления на внезапном сужении не определён, поэтому для оценки точности проведенных исследований примем за истинное значение коэффициента на внезапном сужении его табличное значение $\xi_{\text{BC}}^{\text{T}} = 0,33$ для

$$\frac{\omega_d}{\omega_D} = \frac{0,785}{1,77} = 0,443.$$

8. Находим относительную ошибку при определении коэффициентов при внезапном расширении и сужении:

$$\Delta \xi_{\text{отн}} = \left| \frac{\xi^{\text{оп}} - \xi^{\text{T}}}{\xi^{\text{T}}} \right| \times 100, \quad (6.11)$$

где $\xi^{\text{оп}}$ и ξ^{T} – соответственно опытные и теоретические значения коэффициентов сопротивлений.

Вопросы для самопроверки

1. Что служит причиной потерь напора в местных сопротивлениях?
2. Как изменяется полный, пьезометрический и скоростной напоры при внезапном расширении и сужении?
3. Почему при плавном расширении трубы потери напора меньше, чем при внезапном?

Лабораторная работа №7.
ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПОРОВ
КОРОТКОГО ТРУБОПРОВОДА

Цель работы:

- Изучение закономерностей течения жидкости (уравнения Бернулли) в коротком трубопроводе при последовательном соединении участков труб разного диаметра.
- Построение экспериментальных напорной и пьезометрической линий для горизонтального и наклонного коротких трубопроводов.

7.1. Теоретические основы исследования

Трубопроводы, работающие полным сечением, относятся к напорным трубопроводам. В зависимости от гидравлической схемы работы напорные трубопроводы разделяются на простые и сложные. Простыми называются трубопроводы без изменения диаметра и без ответвлений. Сложными называют трубопроводы, которые имеют ответвления или присоединения с различными диаметрами труб.

В ходе гидравлического расчета трубопроводов устанавливают величину потерь напора. В общем случае потери напора складываются из потерь по длине трубопровода (обусловлены трением о стенки труб) и местных потерь напора (обусловлены образованием водоворотных зон при изменении скорости по величине или направлению). В зависимости от соотношения величин потерь напора по длине и местных потерь напорные трубопроводы подразделяются на короткие и длинные.

Длинными называются трубопроводы, в которых потери напора по длине являются преобладающими. В этом случае при гидравлических расчетах местными потерями пренебрегают либо принимают их в пределах 5-10 % от потерь напора на трение по длине (нефтепроводы, водоводы):

$$h^{\text{дл.тр}} = 1,1 \cdot h_{\text{дл}}. \quad (7.1)$$

Короткими трубопроводами называются трубопроводы, в которых потери напора в местных сопротивлениях составляют более 5-10 % потерь напора на трение (например, трубопроводы насосных станций, технологические трубопроводы предприятий и др.).

При гидравлических расчётах коротких трубопроводов необходимо учитывать как местные потери напора, так и потери напора по длине. Тогда суммарные потери напора определяются по формуле

$$h^{\text{к.тр}} = h_{\text{дл}} + h_{\text{м}} = \frac{v^2}{2g} \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi_{\text{м}} \right). \quad (7.2)$$

В инженерной практике при расчете трубопроводов можно использовать графики изменения удельных энергий – пьезометрические линии и линии полных удельных энергий. Эти графики (их еще называют диаграммами напоров) строят с использованием уравнения Бернулли. Следует отметить, что пьезометрическая линия $P-P$ проходит по уровням воды в пьезометрах (рис. 7.1). Отметка (высота расположения) этой линии относительно плоскости сравнения 0-0 в i -м сечении

$$\Pi_i = z_i + \frac{P_i}{\rho \cdot g} = z_i + H_{\Pi i}, \quad (7.3)$$

где z_i – расстояние от плоскости сравнения 0-0 до оси трубы в рассматриваемом i -м сечении (геометрическая высота);

$H_{\Pi i}$ – высота подъема воды в пьезометре (пьезометрический напор).

Пьезометрический уклон определяется по формуле

$$J_p = -\frac{d}{dl}(z + H_{\Pi}) = -\frac{d\Pi}{dl}, \quad (7.4)$$

где l – длина трубопровода.

Линия полных удельных энергий (линия полных напоров) проходит выше пьезометрической линии на высоту скоростного напора $H_{ск}$. Величина полного напора H_i в сечении трубопровода составляет:

$$H_i = \Pi_i + H_{ск}. \quad (7.5)$$

Линия полных напоров $N-N$ всегда проходит с уклоном в сторону течения, показывая снижение энергии в потоке жидкости по пути движения (см. рис. 7.1). Из-за этого полный напор в каждом последующем сечении ($i+1$) трубопровода меньше, чем в предыдущем, на величину потерь напора между сечениями:

$$H_{i+1} = H_i - h_m \text{ или } H_{i+1} = H_i - h_{дл}. \quad (7.6)$$

Гидравлический уклон определяется из выражения

$$J = -\frac{d}{dl} \left(z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2g} \right) = -\frac{dH}{dl}. \quad (7.7)$$

Следует отметить, что потери напора по длине в трубопроводе накапливаются постепенно, что приводит к плавному уклону линии $N-N$. Из-за местных потерь напора на линии $N-N$ на поперечной оси местного сопротивления обычно наблюдается скачок.

Скоростные напоры в трубопроводах для участков одного диаметра имеют постоянное значение, поэтому расстояние между диниями $N-N$ и $P-P$ изменится только по причине смены диаметров.

Для гидравлического расчета трубопровода расчетные сечения в уравнении Бернулли берут часто на значительном расстоянии друг от друга, соблюдая определенные условия (уравнение выведено для плавно изменяющегося потока, когда линии тока имеют небольшой угол расхождения). Построив диаграммы напоров между расчетными сечениями, можно определить напоры в любом промежуточном сечении.

7.2. Описание экспериментальной установки

Исследуемый сложный трубопровод ТЗ (см. рис. 3.1) состоит из трёх последовательно соединенных прозрачных труб из органического стекла с внутренними диаметрами и длинами $d_I=15$ мм, $l_I=150$ мм, $d_{II}=10$ мм, $l_{II}=100$ мм, $d_{III}=15$ мм, $l_{III}=150$ мм. Переходы между участками трубопровода выполнены в виде плавного сужения и расширения (конфузора и диффузора). Схема трубопровода приведена на рис. 7.1.

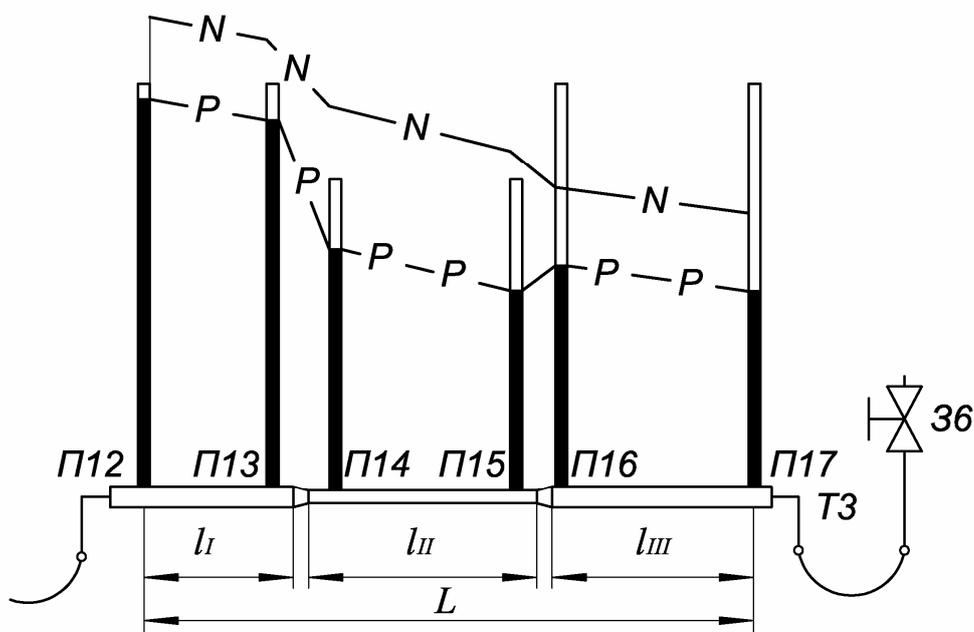


Рис. 7.1. Схема исследуемого короткого трубопровода:
N-N – линия полных напоров; *P-P* – линия пьезометрических отметок
 (пьезометрическая линия)

Конструкцией стенда предусмотрена возможность изменения угла наклона оси трубопровода к горизонту.

7.3. Порядок проведения опыта

1. Подготовить стенд к работе. Включить насос Н1.
2. Вращая рукоятку задвижки 36, установить уровень жидкости в пьезометре № 12 ($h_{П12}$) на отметке примерно 90 см.

3. Снять показания с пьезометров № 13 – 17. Записать показания в табл. 7.1.

4. Закрывать кран КР8. Измерить время Δt заполнения объема V .

5. Поворачивая рукоятку задвижки 36, устанавливать уровень жидкости в пьезометре № 12 ($h_{\text{П12}}$) на отметках 85, 80, 75, 70 см, всякий раз снимая показания с пьезометров № 13 – 17 и измеряя время Δt заполнения объема V .

6. Для изменения угла наклона трубопровода следует ослабить барашек винтового фиксатора, расположенный на тыльной стороне пластины кронштейна, придерживая поворотный механизм за металлическую прямоугольную трубу, к которой крепится прозрачный трубопровод. Установить требуемый наклон. Затянуть барашек винтового фиксатора.

7. Изменяя угол наклона трубопровода, зафиксировать по измерителю высоты подъема z_{12} и z_{17} левого и правого конца трубопровода (в сечениях №12 и №17). Выполнить аналогичные измерения, проведенные ранее для горизонтального трубопровода. Записать показания в табл. 7.2.

7. Закрывать задвижку 36. Выключить питание насоса Н1.

7.4. Обработка опытных данных

1. Определяем расход воды в трубе по выражению (3.5).

2. Среднюю скорость v_I , v_{II} , v_{III} движения жидкости на участках вычисляем по (3.7), учитывая, что на исследуемых участках трубы имеют диаметры $d_I = d_{III} = 15$ мм и $d_{II} = 10$ мм, а площадь поперечного сечения труб соответственно $\omega_I = \omega_{III} = 1,77$ см², $\omega_{II} = 0,78$ см².

3. Вычисляем скоростной напор $H_{\text{ск}}$ на участках при ускорении свободного падения $g = 981$ см/с² и коэффициенте Кориолиса $\alpha=1$:

$$H_{\text{скI}} = \frac{v_I^2}{2g}, \quad H_{\text{скII}} = \frac{v_{II}^2}{2g}, \quad H_{\text{скIII}} = \frac{v_{III}^2}{2g}. \quad (7.8)$$

4. Определяем опытные потери напора по длине на участках:

– горизонтального трубопровода

$$h_I = h_{\text{П12}} - h_{\text{П13}}, \quad h_{II} = h_{\text{П14}} - h_{\text{П15}}, \quad h_{III} = h_{\text{П16}} - h_{\text{П17}}; \quad (7.9)$$

– наклонного трубопровода

$$h_I = (h_{\text{П12}} + z_{12}) - (h_{\text{П13}} + z_{13}), \quad (7.10)$$

$$h_{II} = (h_{\text{П14}} + z_{14}) - (h_{\text{П15}} + z_{15}), \quad (7.11)$$

$$h_{III} = (h_{\text{П16}} + z_{16}) - (h_{\text{П17}} + z_{17}), \quad (7.12)$$

где $z_{12} \dots z_{17}$ – отметки оси трубопровода в точках 12...17 (рис. 7.3).

Таблица 7.1

Исследование горизонтального короткого трубопровода

№ опыта	Объем воды в мерном баке $V, л$	Время наполнения объема $\Delta t, с$	Расход воды $Q, см^3/с$	Отсчеты по пьезометрам						Скорости на участках, см/с		
				$h_{п12}$ см	$h_{п13}$ см	$h_{п14}$ см	$h_{п15}$ см	$h_{п16}$ см	$h_{п17}$ см	$v_1,$ см/с	$v_{п}$ см/с	$v_{п}$ см/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1				90								
2				85								
3				80								
4				75								
5				70								

Продолжение табл. 7.1

$H_{ск1}$ см	Скоростные напоры на участках $H_{скп}$ см	Местные потери напора $h_{конф}$ см	Местные потери напора $h_{диф}$ см	Потери напора по длине на участках			Полные напоры в точках						
				h_1 см	$h_{п}$ см	$h_{пп}$ см	H_{12} см	H_{13} см	H_{14} см	H_{15} см	H_{16} см	H_{17} см	
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27

Таблица 7.2

Исследование наклонного короткого трубопровода

№ опыта	Объем воды в мерном баке $V, л$	Время наполнения объема $\Delta t, с$	Расход воды $Q, см^3/с$	Отсчеты по пьезометрам						Скорости на участках, см/с		
				$h_{п12}$ см	$h_{п13}$ см	$h_{п14}$ см	$h_{п15}$ см	$h_{п16}$ см	$h_{п17}$ см	$v_I,$ см/с	v_{II} см/с	v_{III} см/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1				90								
2				85								
3				80								
4				75								
5				70								

Продолжение табл. 7.2

Скоростные напоры на участках		Местные потери напора		Потери напора по длине на участках			Полные напоры в точках						
$H_{скI}$ см	$H_{скII}$ см	$h_{конф}$ см	$h_{диф}$ см	h_I см	h_{II} см	h_{III} см	H_{12} см	H_{13} см	H_{14} см	H_{15} см	H_{16} см	H_{17} см	
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27

Отметки точек: $z_{12} =$ $z_{13} =$ $z_{14} =$ $z_{15} =$ $z_{16} =$ $z_{17} =$

Угол наклона трубопровода находим по формуле

$$\alpha = \arcsin \left[(z_{17} - z_{12}) / L \right], \quad (7.13)$$

где L – длина трубопровода (см. рис. 7.1).

Отметка любой расчетной точки на оси наклонного трубопровода, например т.15, определяется как $z_{15} = z_{12} + l_p \cdot \sin \alpha$, где l_p – длина трубы от т.12 до т.15.

5. Определяем опытные потери напора в конфузоре и диффузоре:
– для горизонтального трубопровода

$$h_{\text{конф}} = h_{\text{П13}} - h_{\text{П14}} + H_{\text{скI}} - H_{\text{скII}}, \quad (7.14)$$

$$h_{\text{диф}} = h_{\text{П15}} - h_{\text{П16}} + H_{\text{скII}} - H_{\text{скIII}}, \quad (7.15)$$

где $h_{\text{П}}$ – отсчеты по соответствующим пьезометрам;
– для наклонного трубопровода

$$h_{\text{конф}} = h_{\text{П13}} - h_{\text{П14}} + H_{\text{скI}} - H_{\text{скII}} + z_{13} - z_{14}, \quad (7.16)$$

$$h_{\text{диф}} = h_{\text{П15}} - h_{\text{П16}} + H_{\text{скII}} - H_{\text{скIII}} + z_{15} - z_{16}. \quad (7.17)$$

где $z_{13} \dots z_{16}$ – отметки оси трубопровода в точках $z_{13} \dots z_{16}$.

6. Определяем отметки пьезометрической линии в начале исследуемого трубопровода – в точке № 12:

$$\Pi_{12} = z_{12} - h_{\text{П12}}, \quad (7.18)$$

учитывая, что при горизонтальном положении трубопровода центр тяжести сечения находится на плоскости сравнения, то есть $z_{12} = 0$.

7. Находим полный напор в начале исследуемого трубопровода – в точке № 12:

$$H_{12} = \Pi_{12} + H_{\text{скI}}. \quad (7.19)$$

8. Вычисляем полный напор в характерных сечениях (точках) исследуемого трубопровода

$$\begin{aligned} H_{13} &= H_{12} - h_{\text{I}}, \quad H_{14} = H_{13} - h_{\text{конф}}, \quad H_{15} = H_{14} - h_{\text{II}}, \\ H_{16} &= H_{15} - h_{\text{диф}}, \quad H_{17} = H_{16} - h_{\text{III}}. \end{aligned} \quad (7.20)$$

9. По полученным значениям полных напоров строим линию $N-N$ (см. рис. 3.19). Линию $P-P$ строим ниже на величину скоростного напора и находим пьезометрический напор. Например, для точки 14 (рис. 7.2, 7.3).

$$\Pi_{14} = H_{14} - H_{\text{скII}}; \quad H_{\text{П14}} = \Pi_{14} - z_{14}. \quad (7.21)$$

10. В качестве задания по НИР определить гидравлические J , пьезометрические J_p и геометрические i уклоны на участках трубопровода I, II и III:

$$J_I = \frac{(z_{12} + h_{\text{II}12} + H_{\text{скI}}) - (z_{13} + h_{\text{II}13} + H_{\text{скI}})}{l_I}, \quad (7.22)$$

$$J_{\text{II}} = \frac{(z_{14} + h_{\text{II}14} + H_{\text{скII}}) - (z_{15} + h_{\text{II}15} + H_{\text{скII}})}{l_{\text{II}}}, \quad (7.23)$$

$$J_{\text{III}} = \frac{(z_{16} + h_{\text{II}16} + H_{\text{скIII}}) - (z_{17} + h_{\text{II}17} + H_{\text{скIII}})}{l_{\text{III}}}, \quad (7.24)$$

$$J_{pI} = \frac{(z_{12} + h_{\text{II}12}) - (z_{13} + h_{\text{II}13})}{l_I}, \quad (7.25)$$

$$J_{p\text{II}} = \frac{(z_{14} + h_{\text{II}14}) - (z_{15} + h_{\text{II}15})}{l_{\text{II}}}, \quad (7.26)$$

$$J_{p\text{III}} = \frac{(z_{16} + h_{\text{II}16}) - (z_{17} + h_{\text{II}17})}{l_{\text{III}}}, \quad (7.27)$$

$$i_I = i_{\text{II}} = i_{\text{III}} = i = \frac{z_{17} - z_{12}}{L}, \quad (7.28)$$

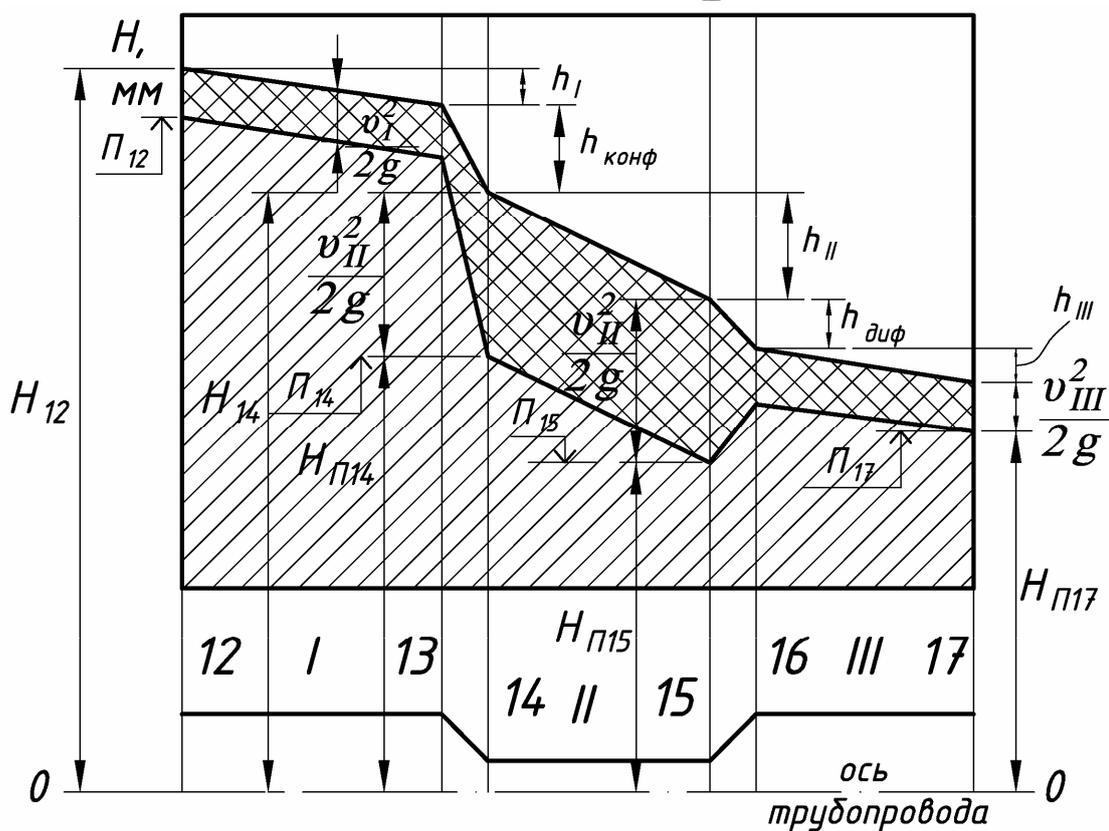


Рис. 7.2. Пример построения пьезометрической и напорной линий для горизонтального трубопровода

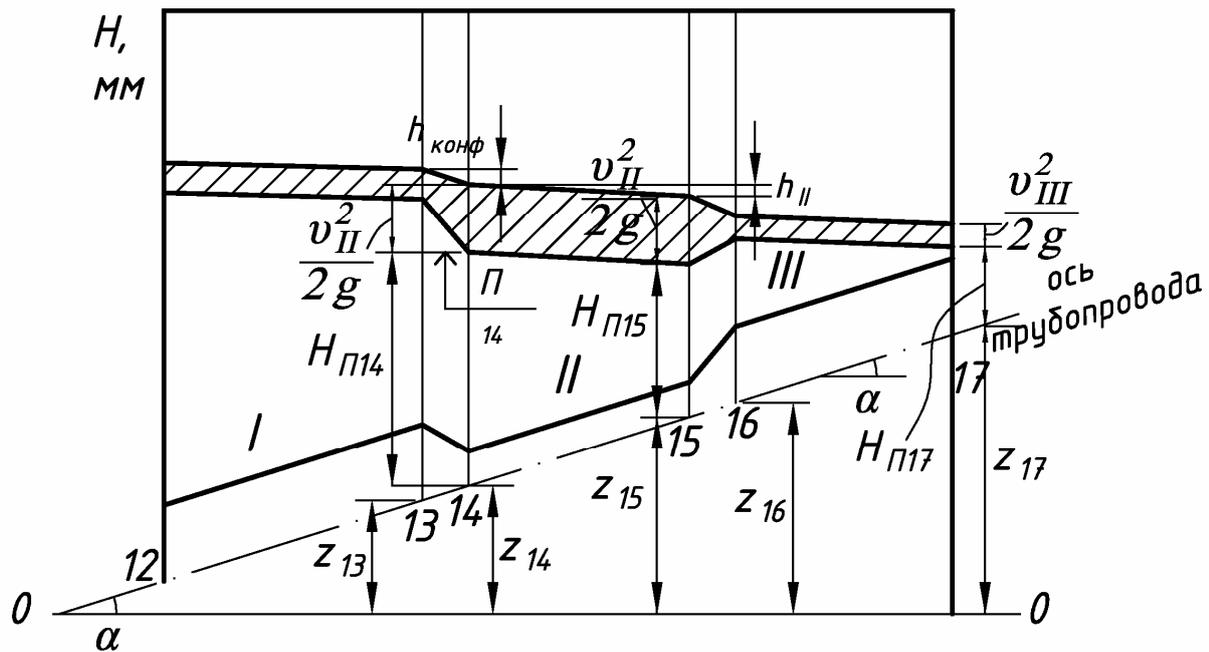


Рис. 7.3. Пример построения пьезометрической и напорной линий для наклонного трубопровода

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определения пьезометрического и гидравлического уклонов.
2. Как определить отметку пьезометрической линии при известных полном напоре, расходе жидкости и диаметре трубы в заданном сечении?
3. В чем различие определения потерь напора в горизонтальном и наклонном трубопроводах?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моргунов, К.П. Гидравлика [Текст]: учебник для вузов / К.П. Моргунов. – СПб.: Лань, 2014. – 276 с.
2. Гусев, А.А. Гидравлика: теория и практика [Текст]: учебник для вузов / А.А. Гусев. – М.: Юрайт, 2015. – 285 с.
3. Сайриддинов, С.Ш. Основы гидравлики [Текст]: учебник для вузов / С.Ш. Сайриддинов. – М.: Изд-во АСВ, 2014. – 385 с.
4. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 384.
5. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика [Текст] / Д.В. Штеренлихт. – М.: КолосС, 2008. – 656 с.
6. Курганов, А.М. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации [Текст] / А.М. Курганов, Н.Ф. Федоров. – Л.: Стройиздат (Ленинградское отделение), 1973. – 408 с.
7. Шевелев, Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб [Текст]: справочное пособие / Ф.А. Шевелев, А.Ф. Шевелев. – М.: ООО «БАСТЕТ», 2008. – 352 с.

О Г Л А В Л Е Н И Е

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
Лабораторная работа №1. ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ	6
Лабораторная работа №2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКУЮ СТЕНКУ	14
Лабораторная работа №3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ	22
Лабораторная работа №4. ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ ТРУБЫ	29
Лабораторная работа №5. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТНЫХ ПОТЕРЬ НАПОРА В КЛИНОВОЙ ЗАДВИЖКЕ И МЕРНОЙ ДИАФРАГМЕ ...	39
Лабораторная работа №6. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТНЫХ ПОТЕРЬ НАПОРА ПРИ ВНЕЗАПНОМ СУЖЕНИИ И РАСШИРЕНИИ ПОТОКА	49
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	63

Учебное издание

Гришин Борис Михайлович
Каледа Ирина Анатольевна
Кочергин Александр Сергеевич
Сафронов Максим Александрович

ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Учебно-методическое пособие
к лабораторным работам

Редактор М.А. Сухова
Верстка Н.А. Сазонова

Подписано в печать 10.08.15. Формат 60×84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл.печ.л. 3,72. Уч.-изд.л. 4,0. Тираж 80 экз.
Заказ №306.

Издательство ПГУАС.
440028, г.Пенза, ул. Германа Титова, 28.