Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени С.М.Кирова»

институт технологических машин и транспорта леса

кафедра промышленного транспорта

ГИДРАВЛИКА

Гидродинамика

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов дневной формы обучения направлений
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»,
23.03.01 «Технология транспортных процессов»,
23.03.03 «Эксплуатация транспортных
и технологических машин и комплексов»,
350302 «Технология лесозаготовительных
и деревоперерабатывающих производств»

Санкт-Петербург
2017

Рассмотрено и рекомендовано к изданию
Институтом технологических машин и транспорта леса
Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета

Составители:
кандидат технических наук, доцент **И.Н. Дмитриева**
кандидат технических наук, доцент **Г.В. Григорьев**
кандидат технических наук, старший преподаватель **А.В. Калистратов**

Отв. редактор
доктор технических наук, профессор **Б.Г. Мартынов**

Гидравлика. Гидродинамика: методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов дневной формы обучения направлений 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 23.03.01 «Технология транспортных процессов», 23.03.03 «Эксплуатация транспортных и технологических машин и комплексов», 350302 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств» / сост.: И.Н. Дмитриева, Г.В. Григорьев, А.В. Калистратов. – СПб.: СПБГЛТУ, 2017. – 46 с.

В методических указаниях к лабораторным работам по курсу «Гидравлика» представлены теоретические материалы, позволяющие выполнить индивидуальные аналитические расчеты по итогам проведенных лабораторных работ по разделу «Гидродинамика».

Темплан 2017 г.

Оглавление

Введение **3**

Лабораторная работа №1 **4-12**

Изучение режимов движения жидкостей в трубах

Лабораторная работа №2 **13-26**

Определение коэффициента гидравлического сопротивления трения по длине для прямой горизонтальной трубы постоянного сечения

Лабораторная работа №3 **25-35**

Изучение характера зависимости коэффициента местных потерь пробкового крана от числа Рейнольдса

Лабораторная работа №4 **36-45**

Изучение уравнения Бернулли

Введение и инструкция по технике безопасности

В методических указаниях даны пояснения для выполнения лабораторных работ по разделам «Гидродинамика» учебного курса «Гидравлика» для бакалавров дневной формы обучения направлений 350302, 230301, 230303 и 15.03.02.

Каждая работа снабжена кратким теоретическим материалом, позволяющим студентам более грамотно подойти к подготовке, выполнению лабораторных работ и обработке опытных данных.

Согласно «Положению о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации студентов» от 23.05.06 года выполнение и защита лабораторных работ включается в аттестационный модуль №2

К практическим лабораторным работам в гидравлической лаборатории допускаются студенты, получившие инструктаж по технике безопасности у руководителя лабораторными занятиями с соответствующим оформлением его в журнале.

Запрещается самостоятельно включать электродвигатели насосов, открывать и закрывать задвижки трубопроводов, включать измерительные приборы и установки.

Лабораторная работа №1
Изучение режимов движения жидкостей в трубах

1. Основные положения и расчетные зависимости

Рядом исследователей было замечено, что существует два принципиально разных режима движения жидкости. Наиболее полно этот вопрос исследовал в 1887 г. английский физик О. Рейнольдс. Он наблюдал за движением жидкости в стеклянной трубе, вводя в поток краску при помощи тонкой трубки.



Рис.1.1. Иллюстрация к опытам Рейнольдса

В одних случаях краска, попадающая в трубу, окрашивала только одну струйку потока (рис. 1.1.а); при этом движение жидкости характеризовалось «слоистым» течением частиц (поперечное перемешивание жидкости здесь отсутствовало). Такой режим движения был назван ламинарным (слоистым).

Эпюра распределения скоростей в круглой напорной трубе для ламинарного режима движения представлена на рис. 1.2

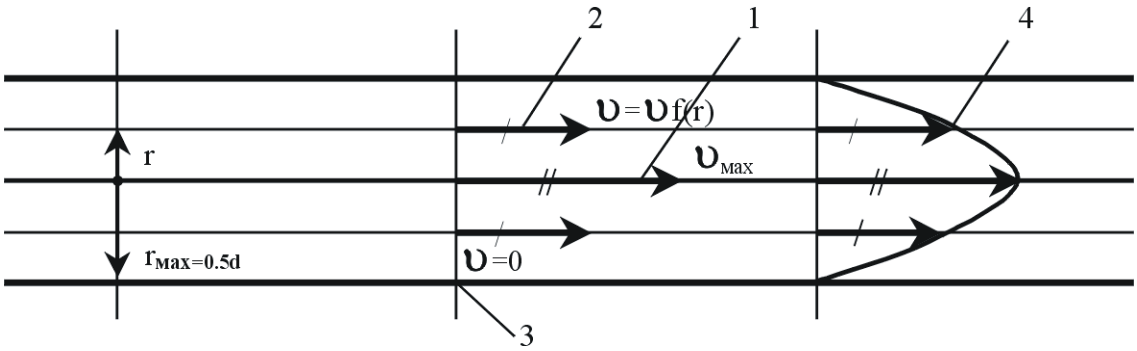


Рис.1.2 Эпюра распределения скоростей в круглой напорной трубе для ламинарного режима

где:

1. υ_{max} - максимальная скорость движения жидкости на оси потока, r =0;
2. $\upsilon=\upsilon(r)< \upsilon_{max;}$
3. υ =0, условие прилипания на стенке, r_{max}=0.5d;
4. вид эпюры скоростей в установившемся ламинарном режиме движения должен сохраняться одинаковым во всех сечениях трубки.

В других случаях вся жидкость в трубе окрашивалась по всему объему (рис. 1.1.б).

При этом наблюдалось беспорядочное движение частиц жидкости, которое сопровождалось интенсивным поперечным перемешиванием жидкости.

Такой режим движения был назван турбулентным (беспорядочным). Установлено, что смена указанных режимов движения происходит резко, скачкообразно.

Для решения вопроса о том, какой из двух упомянутых выше режимов движения жидкости будет иметь место в данном конкретном случае, пользуются особым безразмерным критерием, представляющим соотношение сил инерции и сил вязкости, который получил название числа Рейнольдса:

$$\mathbf{Re} = \frac{\mathbf{UL}}{\boldsymbol{\nu}}. \qquad (1.1)$$

Здесь: U — средняя скорость течения жидкости, м/с;

L — линейный размер живого сечения потока, м;

ν — кинематический коэффициент вязкости жидкости, $м^2/с$.

В качестве величины L обычно принимают:

в случае круглых напорных труб — диаметр d их сечения;

в остальных случаях — гидравлический радиус R:

$$\mathbf{R} = \frac{\boldsymbol{\omega}}{\boldsymbol{\chi}}, \text{ м}$$

где: ω — площадь живого сечения, $м^2$;

χ— смоченный периметр сечения, м.

В соответствии с этим, число Рейнольдса можно представить для круглых напорных труб:

$$\mathbf{Re} = \frac{\mathbf{Ud}}{\boldsymbol{\nu}}. \qquad (1.2)$$

Турбулентный режим устанавливается в результате нарушения слоистого характера движения частиц жидкости под действием внешних факторов (вибрации трубы, входа потока жидкости в трубу под углом к ее оси и т. п.). Возникающее, при этом, дополнительное к основному, возмущенное движение частиц поддерживается проявлением инерции жидкости и гасится силами вязкости. Увеличение скорости основного движения жидкости благоприятствует сохранению и развитию возмущенного движения частиц. Из указанного характера влияния инерции жидкости, вязкости, диаметра трубы и средней скорости основного движения на возмущенное движение частиц жидкости в потоке следует, что большим значениям числа Re должны соответствовать турбулентные режимы, а малым — ламинарные.

Значение числа Рейнольдса, при котором турбулентный режим движения переходит в ламинарный, называется критическим и обозначается $Re_{кр}$. Для потоков жидкостей в круглых трубах были получены следующие значения $Re_{кр}$: Рейнольдс (1883 г.) — $Re_{кр}$ = 1900-2000; Куэгг (1890 г.) — $Re_{кр}$ = 2150; Миллер (1920 г.) — $Re_{кр}$ = 2300.

Последнее значение $Re_{кр}$ в настоящее время считается общепринятым. Опыты показали, что при благоприятных условиях (отсутствие вибрации трубы и начальной турбулентности, плавный вход жидкости в трубу), постепенно увеличивая U, можно сохранить ламинарный режим до так называемых верхних критических чисел $Re_{кр}$, значительно превышающих $Re_{кр}$. Уда-

валось сохранить ламинарный режим до $Re_{кр}$= 12000-13000 (Рейнольдс) и даже до $Re_{кр}$ = 48000 (Бай Ши-И).

Однако в технических трубопроводах, как правило, верхнее критическое число Рейнольдса практически совпадает с $Re_{кр}$. На этом основании при решении вопроса о режиме движения ориентируются на $Re_{кр}$ и считают, что режим движения ламинарный, если $Re<Re_{кр}=2300$, и турбулентный, если $Re>Re_{кр}=2300$.

Для корректного изучения указанных зависимостей необходимо обеспечить на лабораторной установке условия проведения опытов.

Основным условием является обеспечение установившегося режима движения жидкости, то есть режима, при котором основные характеристики движущейся жидкости, скорость и давление в любой точке потока не зависят от времени. Установившийся режим движения обеспечивается на лабораторной установке с помощью переливного устройства.

2. Цели работы

1.На основании наблюдений за поведением струйки подкрашенной жидкости убедиться в существовании двух режимов движения жидкости - ламинарного и турбулентного и получить представление о характере движения частиц жидкости в потоке при этих режимах.

2.Получить данные о величине Re и $Re_{кр}$ для потоков жидкостей в круглых трубах.

3.Сравнить данные визуальных наблюдений и выполненных расчетов.

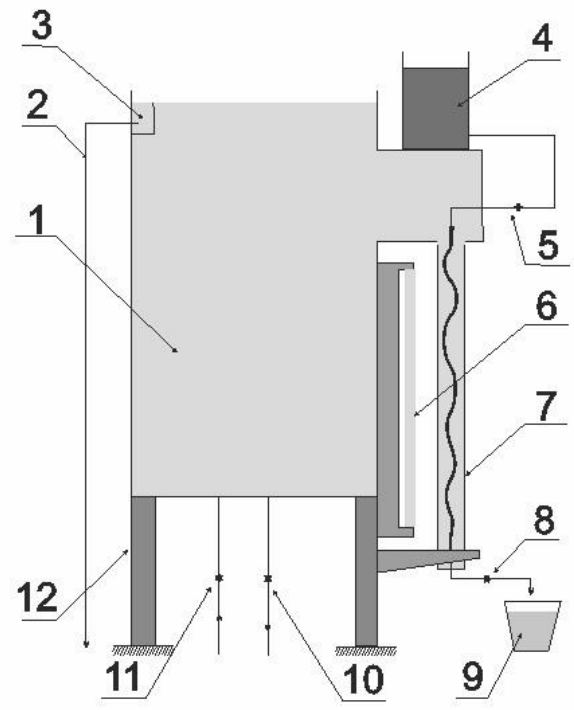


Рис. 1.3. Схема установки для изучения режимов движения жидкостей в трубах

3. Описание установки и порядок проведения опытов

Экспериментальная установка (рис. 1.3) состоит из напорного бака 1, стеклянной трубки 7, емкости с подкрашенной жидкостью 4, лампы подсвечивания 6 и мерной емкости 9. Все основные детали установки смонтированы на металлической подставке 12.

По трубе с краном 11 вода подается в напорный бак 1. Из него по стеклянной трубке 7 она по трубе с краном 8 сливается в бетонный лоток лаборатории или мерную емкость 9. Через переливное устройство 3 по трубе 2 излишки воды из напорного бака сливаются в бетонный лоток. Это обеспечивает постоянство напора в трубке 7 и, следовательно, установившееся движение потока воды в ней. Для определения температуры воды необходимо воспользоваться термометром, для определения времени наполнения мерной емкости используется секундомер. Для улучшения условий наблюдения за характером движения частиц жидкости в стеклянной трубе за этой трубой имеется экран с лампой подсвечивания 6.

Исходное положение установки: краны 8, 10 и 11 закрыты, лампа подсвечивания выключена. Перед началом работы на установке необходимо проверить наличие подкрашенной жидкости в емкости 4 и исправность подсветки.

Опыты рекомендуется проводить в следующей последовательности:

1. Наполнить установку водой. Для этого необходимо:

а) открыть кран 11;

б) после того, как начнется перелив воды через переливное устройство 3, отрегулировать краном 11 расход воды для обеспечения постоянного перелива через переливное устройство.

2. Убедиться в существовании двух режимов движения жидкостей. Для этого следует:

а) открыть последовательно краны 8, 5 и регулировкой крана 8 установить такое движение воды в стеклянной трубе, при котором струйка подкрашенной жидкости не размывается (ламинарный режим);

б) постепенно открывая кран 8, установить такое движение воды в стеклянной трубе, при котором струйка подкрашенной жидкости будет пульсировать не размываясь (переходный режим).

в) постепенно открывая кран 8, установить такое движение воды в стеклянной трубе, при котором струйка подкрашенной жидкости будет размываться (турбулентный режим).

3. Получить данные о величине $Re_{кр}$ для потоков жидкостей в круглых трубах. Для этого нужно проделать опыт, переходя от турбулентного режима к ламинарному режиму фиксируя в каждом из трех опытов:

а) режим движения жидкости (по поведению струйки подкрашенной жидкости);

б) вес мерной емкости с водой G_2, наполненной за время τ указанное в таблице 1.1;

г) температуру воды *t*.

4. После завершения всех опытов привести установку в исходное положение.

4. Методика обработки опытных данных

Обработка опытных данных сводится к определению значения чисел Re для рассмотренных случаев движения жидкости. В каждом опыте последовательно определяются:

1. Расход воды **Q**, измеренный весовым методом, по формуле:

$$\mathbf{Q = \frac{G_2 - G_1}{\rho g \tau}}\ , \text{м}^3/\text{с} \qquad (1.3)$$

где: $\mathbf{G_1, G_2}$- вес мерной емкости без воды, с водой соответственно, Н
ρ – плотность воды, кг/м^3
τ - время наполнения мерной емкости, с
g –ускорение свободного падения, м/с^2, (принимаем для расчетов **g=10** м/с^2)

2. Средняя скорость воды в трубке по формуле:

$$\mathbf{U = \frac{Q}{\omega} = \frac{4Q}{\pi d^2}}\ , \text{м/с} \qquad (1.4)$$

где: **ω** - площадь поперечного сечения стеклянной трубы, м^2
d – диаметр трубы, м

3. Кинематический коэффициент вязкости **ν** определяется по зависимости рис. 1.4, м^2/с;

4. Число **Re** вычисляется по формуле 1.2. С учетом зависимости 1.4. получим

$$\mathbf{Re = \frac{4Q}{\pi d \nu}} \qquad (1.5)$$

Для удобства расчетов введем коэффициент, включающий в себя неизменные параметры

$$\mathbf{A_{воды} = \frac{4}{\pi d \nu}}\ , \text{с/м}^3 \qquad (1.6)$$

С учетом данного коэффициента получим

$$\mathbf{Re = A_{воды} Q} \qquad (1.7)$$

Зависимость 1.5 поможет вам далее построить графики Re = *f*(Q), Re = *f*(d), Re = *f*(τ), Re = *f*(t). в пункте 10 самостоятельного задания.

5. Опытные данные и результаты их обработки

Таблица 1.1

Опытные данные				Результаты расчетов	
d =3.6x10^{-2} , м **G_1** =….,Н **t^o**=…..,C^o				**ν** =……..*10^{-6} м^2/с **A** $_{воды}$=	
№	Режим движения жидкости	**τ**, с	**G_2**, Н	**Q_i** , м^3/с	**Re**
1	Ламинарный	120			
2	Переходный	60			
3	Турбулентный	30			

Пользуясь графиками вязкости (Рис. 1.4), определить коэффициент **ν** для бензина, масла, и ртути при измеренной для воды t^o.

По формуле 1.6 вычислить значения

$$\mathbf{A_{ртути} = \frac{4}{\pi d \nu_{рт}} =}$$

$$\mathbf{A_{бензина} = \frac{4}{\pi d \nu_{б}} =}$$

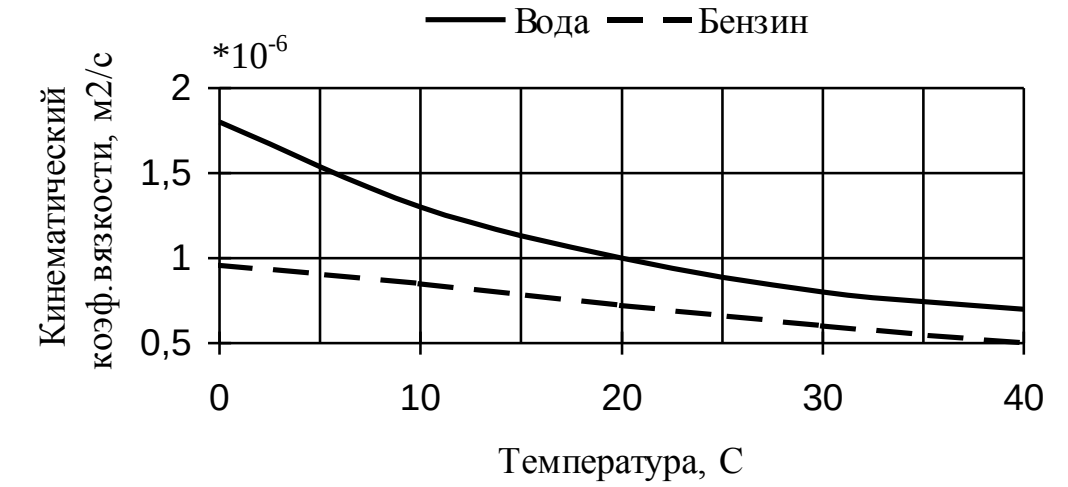
$$\mathbf{A_{масла} = \frac{4}{\pi d \nu_{м}} =}$$

Рассчитать Re по формуле 1.7 для бензина, масла, и ртути используя полученные значения коэффициента A и расход Q_i, взятый из таблицы 1.1.

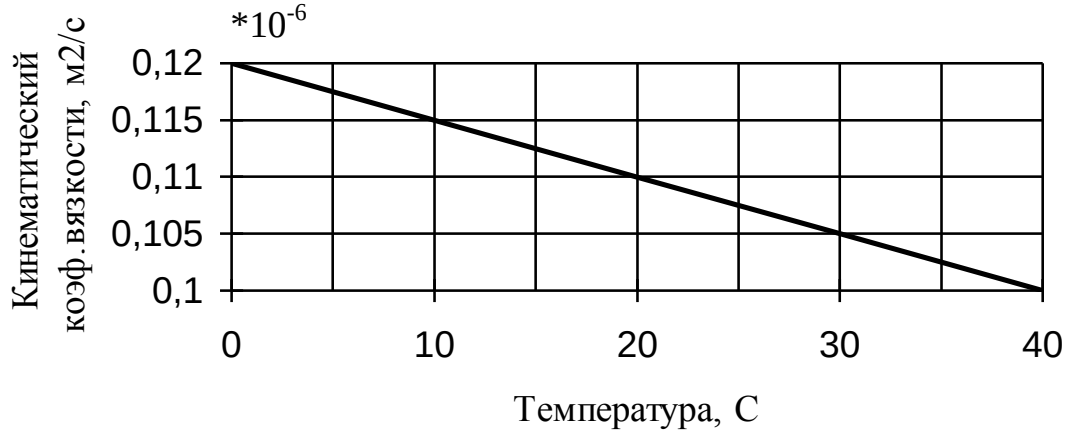
Результаты расчетов занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Жидкость	**t^o**, C	**ν**, м^2/с	**Re(Q_1)**	**Re(Q_2)**	**Re(Q_3)**
Ртуть					
Бензин					
Масло					



Ртуть



Масло

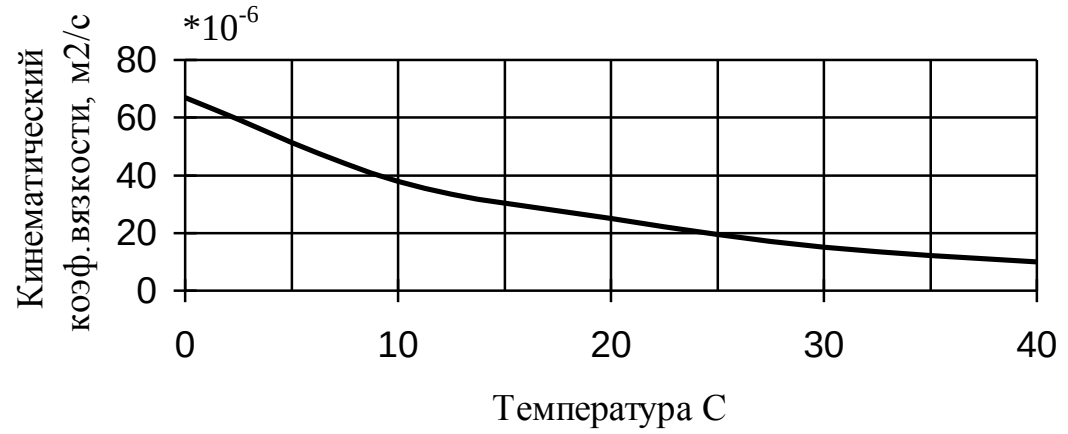


Рис 1.4 Графики зависимости кинематического коэффициента вязкости ртути, воды, бензина, масла от температуры

6. Выводы по проделанной работе и результатам расчета таблицы 1.2

7. Список вопросов к защите лабораторной работы

1. Дать определение установившегося режима движения жидкости.

2. Как он обеспечивается на лабораторной установке.

3. Дать определение объемного расхода жидкости.

4. Способы его экспериментального определения, используемые единицы измерения.

5. Дать определение ламинарного режима движения жидкости. Построить эпюру скорости.

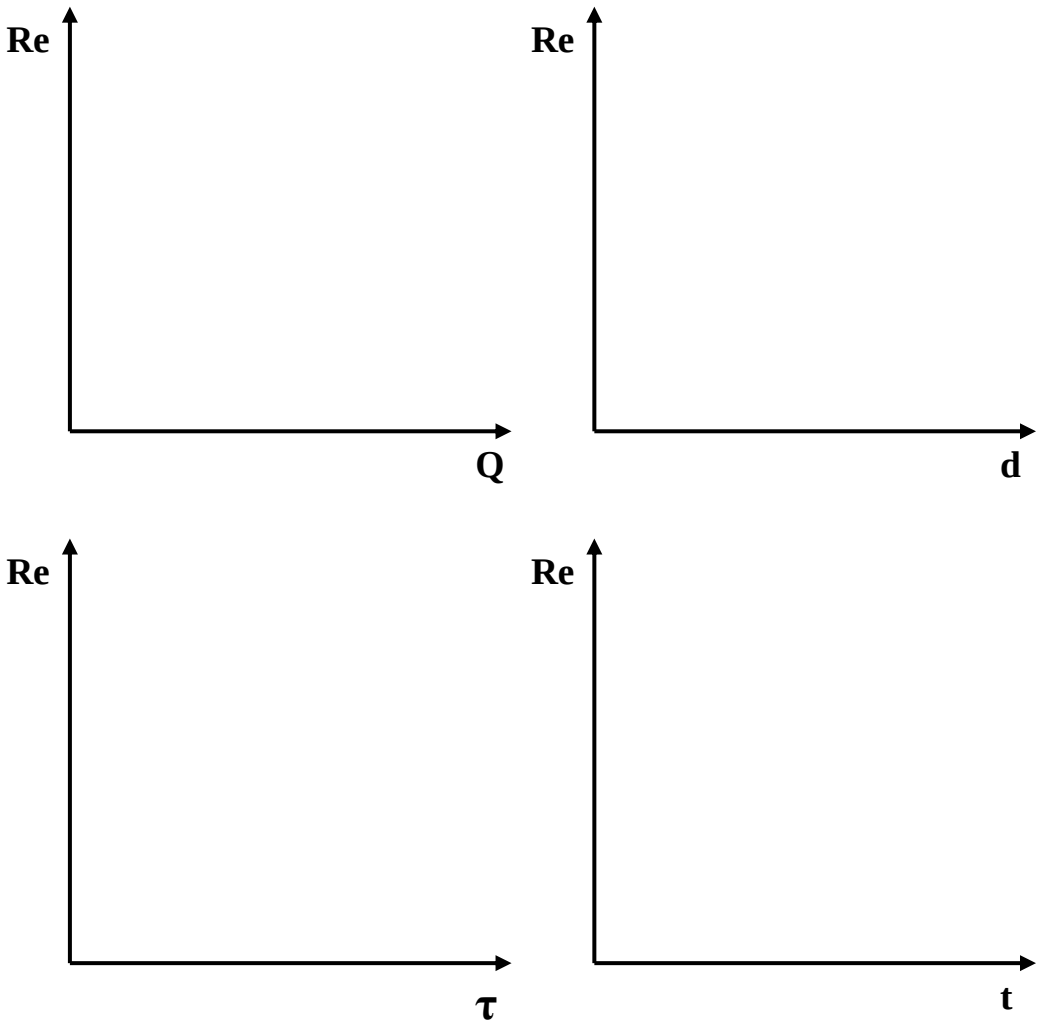
6. Дать определение турбулентного режима движения жидкости. Построить эпюру скорости.

7. Что такое критерий Рейнольдса? Соотношением каких сил и факторов он является?

8. Что такое $Re_{кр}$? Что такое верхнее критическое число Re?

9. Как можно сохранить ламинарный режим движения до значений $Re=(5\text{-}20)\ Re_{кр}$? Будет ли он устойчивым?

10. Построить по формуле 1.5. графики Re = *f*(Q), Re = *f*(d), Re = *f*(τ), Re = *f*(t).



Работа выполнена _____20__г. _____
(подпись преподавателя)

Работа защищена _____20__г. _____
(подпись преподавателя)

Лабораторная работа №2
Определение коэффициента гидравлического сопротивления трения по длине для прямой горизонтальной трубы постоянного сечения

1. Основные положения и расчетные зависимости

При движении потока жидкости внутри трубы происходят значительные потери энергии (напора). Эти потери вызываются касательными напряжениями, возникающими вследствие появления сил трения между поверхностью потока и внутренней поверхностью трубы, а также внутри жидкости.

Существует два вида потерь энергии:

а) потери энергии по длине потока,

б) местные потери.

Рассмотрим установившееся движение воды на горизонтальном участке трубопровода постоянного сечения. Движение жидкости называется установившимся, если его характеристики в точке: скорость и давление не изменяются с течением времени.

Напишем уравнение Бернулли между сечениями 1—1 и 2—2 , относительно плоскости сравнения 0–0 (Рис. 2.1):

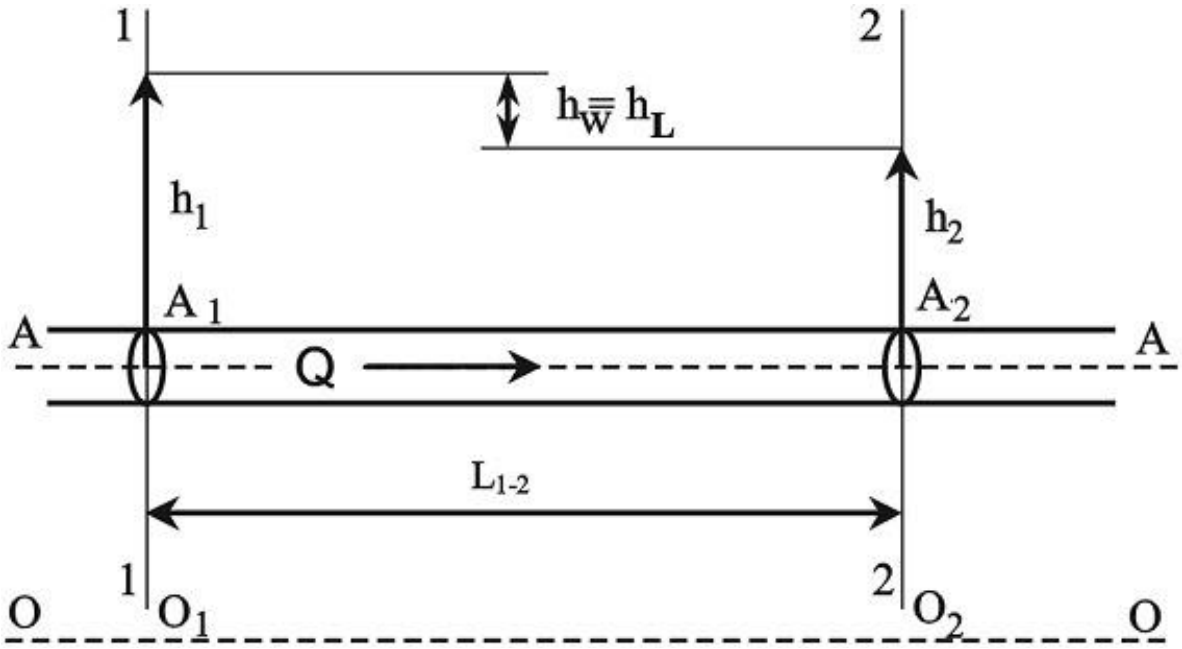


Рис.2.1.Графическое изображение уравнения 2.1

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} + h_w \quad (2.1)$$

Здесь: Z_1, Z_2 - удельные энергии положения, определяются как расстояние от плоскости сравнения до центра тяжести сечения, м.

P_1, P_2 – давление в центре тяжести сечения 1-1 и 2-2, Па,

α_1, α_2 – коэффициенты Кориолиса, безразмерные величины;

U_1, U_2 – средняя скорость в сечениях 1-1 и 2-2, м/с;

h_w – потери энергии между сечениями 1-1 и 2-2, м;

О-О – плоскость сравнения, согласно такому расположению получим

$$Z_1=O_1A_1=O_2A_2=Z_2$$

Для упрощения задачи можно выбрать плоскость сравнения проходящую по оси горизонтального участка трубопровода, таким образом получим

$$Z_1=Z_2=0.$$

$\frac{P_1}{\rho g}$, $\frac{P_2}{\rho g}$ - удельная энергия давления (пьезометрическая высота) в сечениях 1-1 и 2-2, м;

$Z_i + \frac{P_i}{\rho g}$ - удельная потенциальная энергия в сечении, м;

$\frac{\alpha_i U_i^2}{2g}$ - удельная кинетическая энергия в сечении, м;

h_1 и h_2 - показания пьезометров, установленных в сечениях 1-1 и 2-2, м.

С их помощью можно определить величину избыточного давления $P_{изб}$ в этих сечениях:

$$P_{изб1} = \rho g h_{изб1};$$
$$P_{изб2} = \rho g h_{изб2} \qquad (2.2)$$

Величина полного давления **P** определяется из основного уравнения гидростатики

$$P = P_{вн} + \rho g h, \qquad (2.3)$$

где: $P_{вн}$ – внешнее давление, Па.

Так как изучаемый участок трубы не имеет препятствий, которые вызвали бы местные потери напора, то $h_W = h_L$ т. е. здесь имеются только потери напора по длине трубы. Суммарные потери по длине всего участка трубы будут равны:

$$h_L = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}. \qquad (2.4)$$

Известно, что зависимость $h_L = f(U)$ выражается уравнением параболы такого вида:

$$h_L = KU^n, \qquad (2.5)$$

где **K** - некоторый коэффициент пропорциональности;

n - показатель степени.

Для удобства исследования уравнение (2.5.) обычно представляют в лога-

рифмическом виде:

$$\mathbf{lgh_L=lgK+nlgU} \qquad (2.6)$$

Если на логарифмической шкале откладывать по оси y – логарифм h_L а по оси x – логарифм U (рис.2.2) и считать, что lgK=C (постоянная величина), то получим уравнение прямой линии такого типа y = C+nx. При этом на основании графической обработки опытных данных можно определить показатель степени n, как тангенс угла наклона прямой линии y=C+nx. Постоянная C=lgK определится в этом случае по величине y, когда x=0.

Зависимость lg h_L=f(lg U) представляет собой ломаную линию. Анализ графика позволяет сделать следующий вывод: в области ламинарного режима движения (для чисел Рейнольдса, меньших 2300) существует линейная связь между потерями энергии и скоростью движения, которая определяется прямой AB с углом наклона α, равным 45°, то есть угловой коэффициент уравнения y=C+nx равен единице (n = 1).

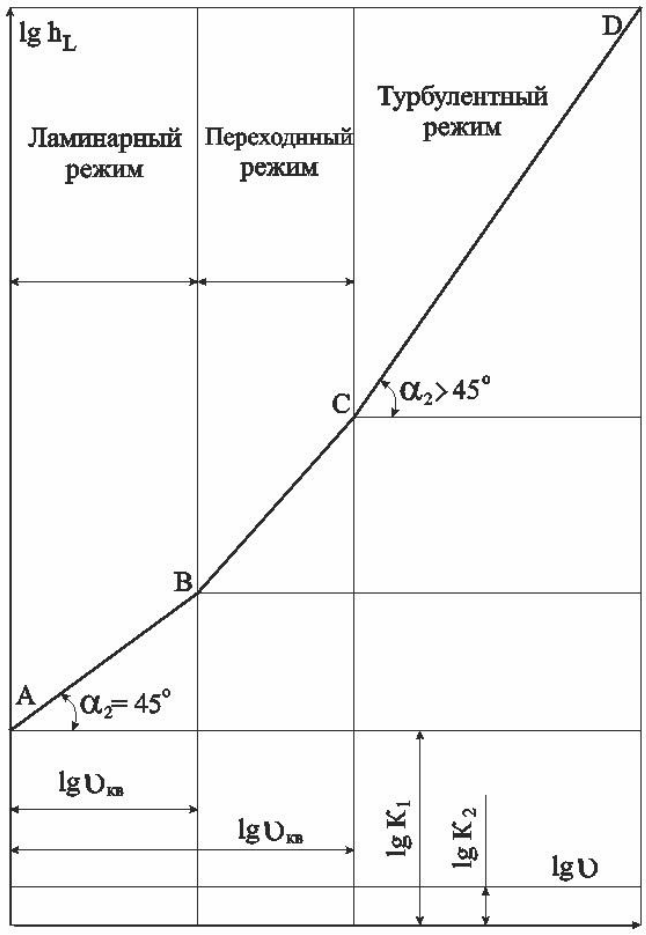


Рис 2.2 Иллюстрация уравнения 2.6.

В области развитого турбулентного режима угол наклона линии графика резко возрастает (линия CD) и угловой коэффициент n, как показывают многочисленные опытные данные, будет равен примерно двум (n=2). Опытами установлено также, что между ламинарным и турбулентным режимом движения существует переходная область, которой на графике соответствует линия BC, и угловой коэффициент n изменяется в пределах от единицы до двух (1<n<2). При этом точке B на графике соответствует нижняя критическая скорость $U_{нк}$, а точке C ($U_{вк}$ верхняя критическая).

Таким образом, установлено, что потери энергии (напора) при движении вязкой жидкости находятся в непосредственной зависимости от величины средней скорости движения потока.

Для определения потерь напора в трубе пользуются формулой следующего вида:

$$\mathbf{h_L = \lambda \frac{L}{d} \frac{U^2}{2g}}, \qquad (2.7)$$

где: **L** – длина участка трубы, м;

d – диаметр трубы, м;

λ – коэффициент гидравлических сопротивлений трения, определяемый из опытов.

Этой формулой обычно пользуются для определения потерь в трубах круглого сечения, когда известна средняя скорость течения потока.

В лабораторной работе удобнее пользоваться формулой для $\mathbf{h_L}$ в виде:

$$\mathbf{h_L = \lambda \frac{Q^2}{\omega^2} \frac{L}{2gd} = 0.083 \lambda L \frac{Q^2}{d^5}}. \qquad (2.8)$$

Пользуясь формулой 2.8, получим зависимость для опытного определения коэффициента гидравлического трения λ.

$$\mathbf{\lambda = 12.05 \cdot h_L \cdot \frac{d^5}{Q^2 \cdot L}} \qquad (2.9)$$

Для ламинарной области λ определяют по теоретической формуле:

$$\mathbf{\lambda = \frac{64}{Re}}. \qquad (2.10)$$

Тогда для ламинарного режима движения потери выразятся формулой:

$$\mathbf{h_L = \frac{64}{Re} \frac{0.083 L Q^2}{d^5} = 4.17 \frac{LQ\nu}{d^4}}. \qquad (2.11)$$

Для турбулентной и переходной области можно воспользоваться одной из многочисленных эмпирических формул для гладких труб, например, формулой Блазиуса:

$$\mathbf{\lambda = \frac{0.316}{\sqrt[4]{Re}}}, \qquad (2.12)$$

Или формулой Ф.А. Шевелева, полученной на основании обработки данных Никурадзе:

$$\mathbf{\lambda = \frac{0.25}{Re^{0.226}}}. \qquad (2.13)$$

Для турбулентного режима λ можно определить по следующим формулам:

по эмпирической формуле:

$$\mathbf{\lambda = 0.02\sigma\left(1 + \frac{1}{40d}\right)}, \qquad (2.14)$$

где: **d –** диаметр трубы, м;

σ – поправочный коэффициент, учитывающий загрязненность труб.

для новых труб **σ** =1,

для старых труб **σ** зависит от диаметра трубы (табл.2.1).

Таблица 2.1

d, м	0.05	0.10	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.50
σ	2.17	2.00	1.80	1.40	1.30	1.20	1.10	1.06	1.00

Для шероховатых труб **λ** определяют по формуле академика Павловского:

$$\lambda = \frac{78.5\ n^2}{R^{2y}}, \qquad (2.15)$$

где: **n** - коэффициент шероховатости,

y – коэффициент, зависящий от шероховатости и гидравлического радиуса,

R - гидравлический радиус, для круглой трубы $R = \frac{d}{4}$, м.

Значение коэффициента шероховатости **n** и 2**y** приводятся в таблице 2.2

Таблица 2.2

№	Характеристика стенок	**n**	2**y** при **R**≤1м	2**y** при **R**>1м
1	Штукатурка из чистого цемента	0.011	0.300	0.260
2	Чистые чугунные и стальные трубы	0.011	0.315	0.270
3	Водопроводные трубы при нормальных условиях	0.012	0.333	0.285
4	Водосточные трубы при нормальных условиях, кирпичная кладка	0.013	0.342	0.295
5	загрязненные водопроводные и водосточные трубы, средний бетон	0.014	0.355	0.308
6	Средняя облицовка из тесаного камня, грязные водотоки	0.015	0.370	0.317

Начиная с **Re**=3000, на коэффициент **λ** может оказывать влияние и шероховатость внутренней поверхности трубы. Однако это влияние не во всех случаях начинается с **Re** =3000. Структура турбулентного потока такова, что вблизи стенок, где хаотическое движение частиц жидкости ограничено и местные осредненные скорости малы, сохраняется ламинарный характер движения частиц жидкости, толщина этого ламинарного слоя тем меньше, чем больше число **Re**. Поэтому, если шероховатость трубы мала, то бугорки шероховатости оказываются в ламинарном слое до весьма значительных чи-

сел **Re** и не влияют на **λ**. Влияние шероховатости начинается с того значения числа **Re**=**Re***, при котором толщина ламинарного слоя снижается до величины порядка высоты наибольших бугорков шероховатости. При **Re**>**Re*** часть наиболее высоких бугорков обтекается с отрывом потока. В этих местах возникает дополнительное вихревое движение жидкости и, следовательно, появляется дополнительное преобразование механической энергии потока в тепло. Начиная с некоторого значения чисел **Re**=**Re****, толщина ламинарного слоя становится настолько малой, что практически все бугорки обтекаются с отрывом потока. При **Re**>>**Re**** изменение чисел **Re** уже не может оказать заметного влиянии на характер обтекания бугорков шероховатости и поэтому коэффициент **λ** не зависит от числа **Re**. Значения чисел **Re*** и **Re**** тем меньше, чем больше шероховатость трубы.

2. Цели работы

1.Экспериментальное определение потери напора по длине при установившемся равномерном движении воды в круглой трубе;

2.Определение областей сопротивления, к которым относятся проведенные опыты;

3.Экспериментальное определение коэффициента гидравлического трения по формуле 2.9;

4.Сопоставление полученных результатов со значениями **λ**, рассчитанными по формулам 2.10, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15;

5. Опытное определение зависимости потери напора по длине от средней скорости движения воды в трубопроводе.

6. Построение линий напоров на горизонтальном участке трубопровода.

3. Описание установки и порядок проведения опытов

Работа выполняется на установке, схема которой показана на рисунке 2.3. Установка состоит из напорного бака 3 с переливным устройством 4, стальной цельнотянутой трубы 6, дифференциального пьезометра 8 и мерной емкости 9.

Вода по трубе 1 подается в напорный бак 3, а из него в трубу 6. Излишки воды, подаваемой в бак через перегородку переливного устройства 4, по трубе 5 сливаются в бетонный лоток лаборатории. Этим обеспечивается питание трубопровода под постоянным напором и, следовательно, установившееся движение воды в нем. Дифференциальный пьезометр 8 и соединительные шланги 7 предназначены для определения величины h_L на измеряемом участке трубопровода длиной L=4 м. Мерная емкость, весы, секундомер и термометр необходимы для определения расхода и температуры воды в трубе 6.

Для выявления зависимости $\lambda = f(\mathrm{Re})$ по трубе 6 пропускается вода с различными скоростями. Скорость изменяется с помощью крана 10. Для каждой характерной области зависимости $\lambda = f(\mathrm{Re})$ необходимо получить две-три

опытные точки. Величина $\mathbf{h_L}$ равна разности уровней воды в трубках дифференциального пьезометра, задана в таблице 2.3

Перед проведением опытов необходимо:

- наполнить напорный бак и пропустить воду через опытный трубопровод. Для этого следует на некоторое время открыть вентиль 2 и кран 11. Эта операция необходима для заполнения системы водой той температуры, которую имеет вода в водопроводной сети. Проверить отсутствие воздушных пробок в соединительных шлангах дифференциального пьезометра закрыв кран 10 и убедившись в том, что уровни воды в пьезометре стоят на одной отметке.

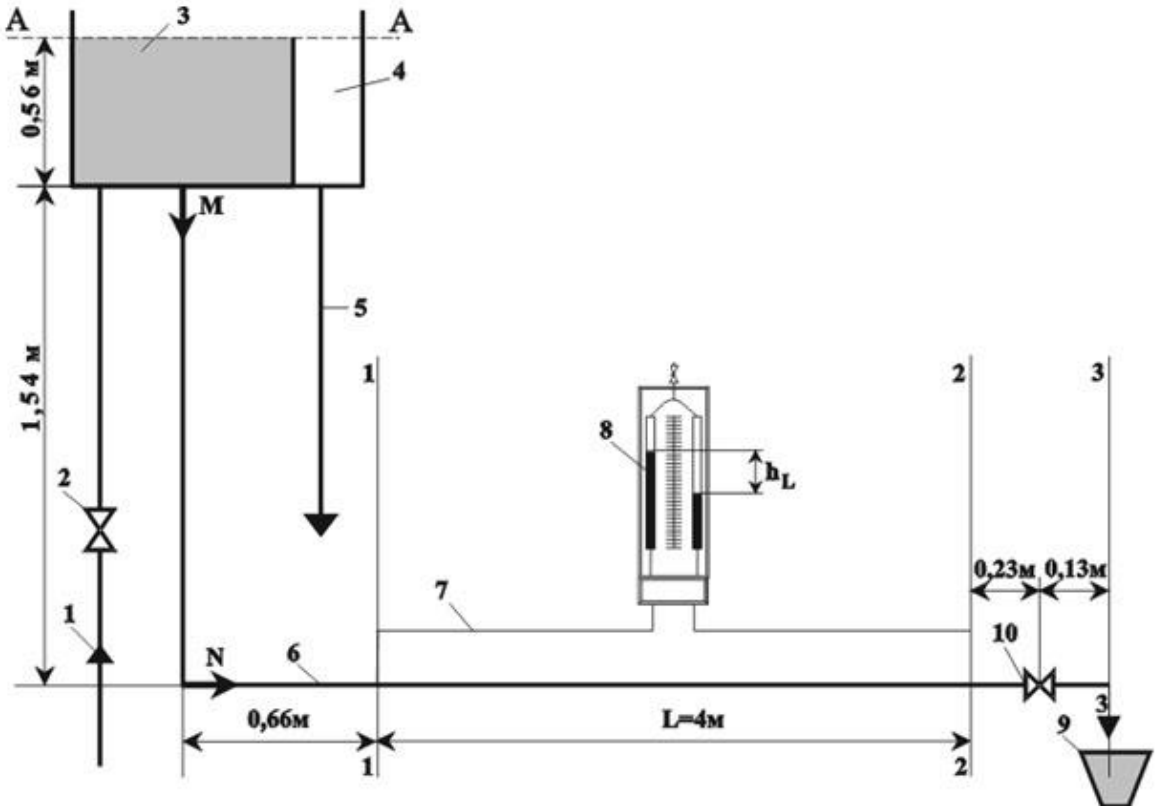


Рис 2.3 Схема лабораторной установки

- Отрегулировать подачу воды вентилем 2 в напорный бак так, чтобы при полностью открытом кране 10 при проведении ***каждого опыта*** был небольшой слив через трубу 5. Это обеспечит проведение опытов при установившемся режиме движения жидкости.

- В каждом опыте установить заданную величину $\mathbf{h_L}$, которая является разницей значений $\mathbf{h_1}$ и $\mathbf{h_2}$ в трубках дифференциального пьезометра 8.

- Для определения расхода весовым методом, за заданное время наполнить мерную емкость 9 и определить ее вес.

- Опыты повторить семь раз для разных величин $\mathbf{h_L}$.

- Замерить температуру воды, вытекающей из трубы 6.

После проведения опытов необходимо закрыть кран 10 и вентиль 2.

4. Методика обработки опытных данных

Методика обработки опытных данных сводится к последовательному вычислению

- расхода воды по формуле 1.3.
- скорости течения воды по формуле 1.4.
- числа Рейнольдса по формуле 1.5
-коэффициента гидравлического сопротивления трения по формуле 2.9
- коэффициент кинематической вязкости берется по графику (рис.1.4)

Опытные данные и результаты расчетов заносятся в таблицы 2.3 и 2.4

Таблица 2.3

d = 1.4 см, **L** = 4 м, **τ** = 60 с, **t** =…….°C, **ν** =……$м^2/с$, $\mathbf{G_1}$ =……,Н						
№	$\mathbf{h_L}$, см	$\mathbf{G_2}$, Н	**Q**, $м^3/с$	**U**, м/с	**Re**	**λ**
1	0.3					
2	0.6					
3	1.0					
4	10					
5	15					
6	20					
7	30					

Для построения линий напоров необходимо знать удельную энергию давления. Поскольку дифференциальные пьезометры показывают относительные значения, нужно определить какую величину показал бы обычный пьезометр установленный в соответствующем сечении.

Этот расчет можно выполнить, если воспользоваться размерами опытной установки, представленной на рисунке 2.3 и уравнением 2.1.

Если написать уравнение 2.1 для сечений А-А и 1-1, то после подстановки значений Z, P, U и проведения расчетов, уравнение Бернулли сведется к виду:

$$\mathbf{2{,}1 = \frac{P_{изб1}}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} + \left(\frac{\lambda l}{d} + 0.5 + 4 * 0.8\right)\frac{U^2}{2g}}$$

Следовательно

$$\mathbf{h_{изб1} = \frac{P_{изб1}}{\rho g} = 2.1 - (4.7 + 157\lambda)\frac{U^2}{2g}} \qquad (2.16)$$

Величина $\mathbf{h_{изб2}}$ отличается от $\mathbf{h_{изб1}}$ на величину потерь по длине на исследуемом участке, следовательно

$$\mathbf{h_{изб2} = h_{изб1} - h_L} \qquad (2.17)$$

Величины $\mathbf{P_{изб1}}$ и $\mathbf{P_{изб2}}$ определяются по формуле 2.2.

Таблица 2.4

№	157λ	$\frac{U^2}{2g}$, м	$h_{изб1}$, м	$h_{изб2}$, м	$P_{изб1}$, Па	$P_{изб2}$, Па
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Построение пьезометрической линии и линии полных напоров ведется на рисунке 2.6 по индивидуальному заданию. При построении пьезометрической линии и линии полных напоров следует учитывать геометрические размеры опытной установки, представленной на рисунке 2.6. Линии напоров строятся для всего горизонтального участка трубопровода (от поворота до конечной точки, где жидкость вытекает из трубы).

Вычислить для ламинарного режима движения жидкости погрешность η по формуле 2.18, используя для определения теоретического значения коэффициента гидравлических сопротивлений трения формулу 2.10. Результаты расчетов занести в таблицу 2.5. Если погрешность превышает 10%,следует повторить эту группу опытов.

$$\eta = \left| \frac{\lambda_{опытное} - \lambda_{теоретич.}}{\lambda_{опытное}} \right| * 100\% . \qquad (2.18)$$

Таблица 2.5

№ опыта	Re	$\lambda_{опытное}$	$\lambda_{теоретическое}$	η, %
1				
2				
3				

Вычислить для турбулентного режима движения жидкости погрешность η по формуле 2.18 , используя для определения теоретического значения коэффициента гидравлических сопротивлений трения формулы 2.12 , 2.13, 2.14, 2.15.

Результаты расчетов занести в таблицу 2.6. В тех опытах, где погрешность превышает 10%, опыты следует повторить.

Нанести на графики теоретических зависимостей λ= *f*(Re), представленных на рисунках 2.4.и 2.5 полученные в ходе опытов значения для ламинарного и турбулентного режимов соответственно.

Таблица 2.6

№ опыта	Re	λ опыт-ное	λ теор. по формуле 2.12	η, %	λ теор. по формуле 2.13	η, %	λ теор. по формуле 2.14	η, %	λ теор. по формуле 2.15	η, %
4										
5										
6										
7										

По результатам расчетов таблицы 2.4 построить пьезометрическую линию и линию полных напоров в соответствии с полученным заданием.

Ламинарный режим $\lambda = \frac{64}{R_e}$

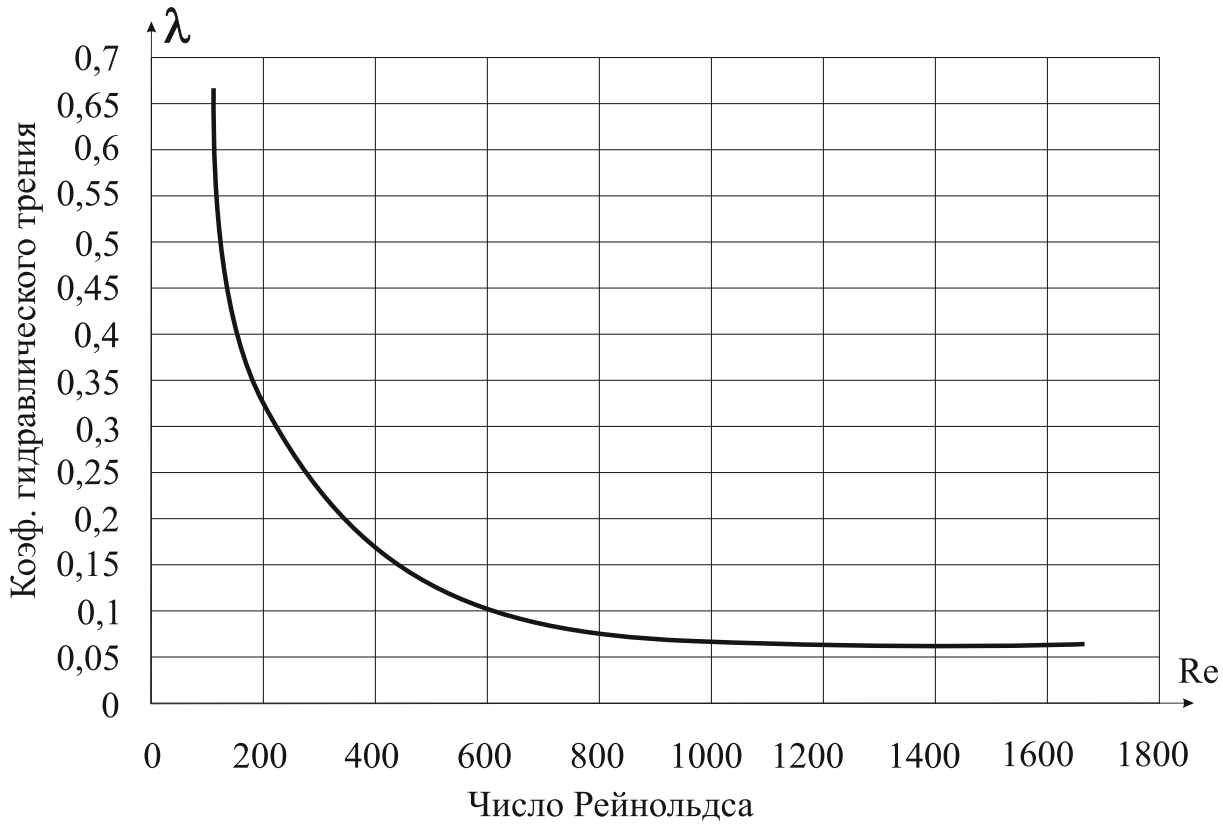


Рис 2.4 Зависимость λ (коэффициента гидравлических сопротивлений трения) от числа Рейнольдса в ламинарном режиме

Турбулентный режим $\lambda = \frac{0{,}316}{\sqrt[4]{R_e}}$

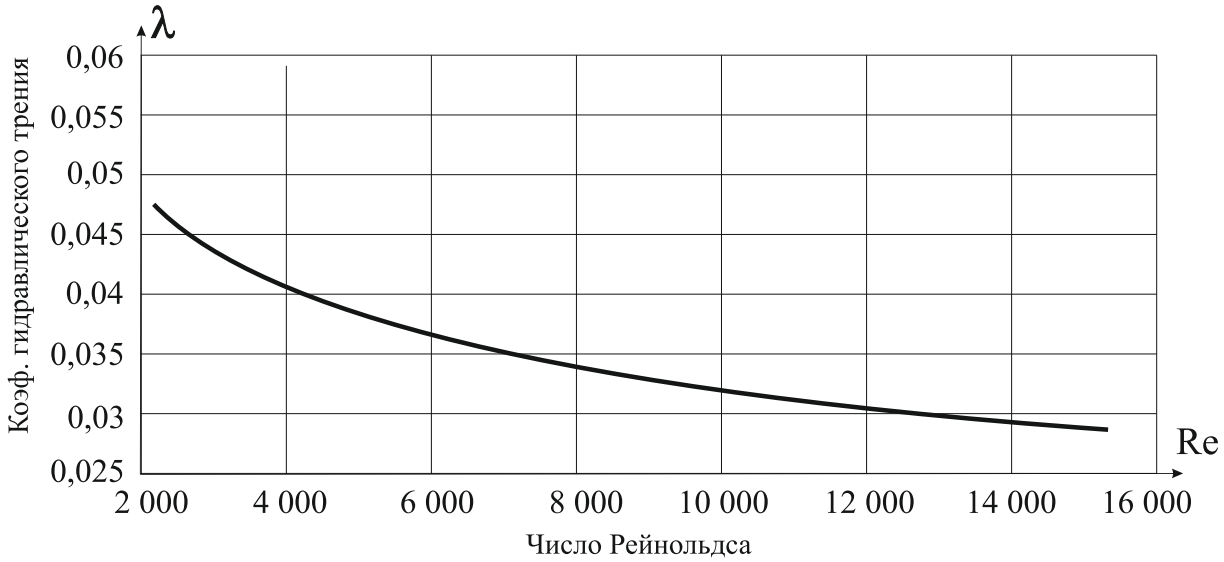


Рис. 2.5 Зависимость λ (коэффициента гидравлических сопротивлений трения) от числа Рейнольдса в турбулентном режиме

5. Выводы по проделанной работе и результатам расчетов таблиц

6. Список вопросов к защите лабораторной работы

1. Какие потери энергии возникают при движении жидкости в напорном трубопроводе, и чем они вызваны?

2. Что такое плоскость сравнения? Как и для чего она строится?

3. Пьезометр – его устройство и назначение.

4. Сравнить полученные опытные результаты коэффициента гидравлического сопротивления трения λ и потерь по длине $\mathbf{h_L}$ при ламинарном режиме с расчетными формулами 2.10 и 2.11. (График на рис. 2.4)

5. Сравнить полученные опытные результаты коэффициента гидравлических сопротивлений трения λ и $\mathbf{h_L}$ при турбулентном режиме с расчетными формулами 2.12, 2.13, 2.14 и 2.15.Какая из этих формул наиболее близка к опытным результатам? Почему? (График на рис. 2.5)

6. По опытным данным (опыт №…..и опыт №…..) построить линии пьезометрических напоров на рис.2.6. (номера опытов назначает преподаватель). Объяснить полученные графики.

7. По опытным данным (опыт №…...) построить линию полных напоров на рис.2.6. (номер опыта назначает преподаватель). Объяснить полученный график.

8. Пользуясь результатами проведенных расчетов и геометрическими размерами, указанными на рис.2.6, вычислить давление в точке А трубопровода (местоположение точки назначает преподаватель).

9. Пользуясь результатами проведенных расчетов и геометрическими размерами, указанными на рис.2.6, вычислить полную удельную энергию в точке В трубопровода (местоположение точки назначает преподаватель).

10. Дать теоретическое объяснение причине высокой погрешности при расчете коэффициента гидравлических сопротивлений трения λ при ламинарном режиме в сравнении с расчетной формулой.

Работа выполнена_____20__ г. _____

(подпись преподавателя)

Работа защищена _____20_ г. _____

(подпись преподавателя)

Лабораторная работа №3
Изучение характера зависимости коэффициента местных потерь пробкового крана от числа Рейнольдса

1. Основные положения и расчетные зависимости

В выполненных ранее лабораторных работах №1 и №2 мы познакомились с двумя режимами движения жидкости в круглых трубопроводах: ламинарным и турбулентным и исследовали потери энергии, вызванные касательными напряжениями, появляющимися вследствие возникновения сил трения между слоями потока жидкости, а также между движущейся жидкостью и поверхностью трубы.

В этой работе нам предстоит познакомиться с местными потерями напора, которые возникают вследствие преодоления потоком жидкости различных препятствий на пути своего движения.

Местные потери возникают там, где поток движущейся жидкости претерпевает резкую деформацию, вызванную различного рода изменениями живого сечения потока, то есть: расширениями, сужениями потока, поворотами, препятствиями в виде кранов, сеток, диафрагм и т.д. В этих местах поток, обтекая препятствие, резко деформируется, вследствие чего образуются водоворотные зоны и происходит интенсивный обмен энергией между частицами жидкости, на что расходуется часть энергии потока.

Это явление можно описать так: частицы жидкости двигаются по трубопроводу со скоростью $\mathbf{U_1}$, встречают препятствие и изменяют прямолинейное движение на криволинейное по направлению к оси потока. При этом периферийные слои жидкости будут пытаться сжать поток, чтобы преодолеть препятствие, а частицы, двигающиеся вблизи оси потока, будут противодействовать сжатию. В результате происходят столкновения отдельных частиц движущейся жидкости, следствием чего являются водоворотные зоны и завихрения потока (рис.3.1).

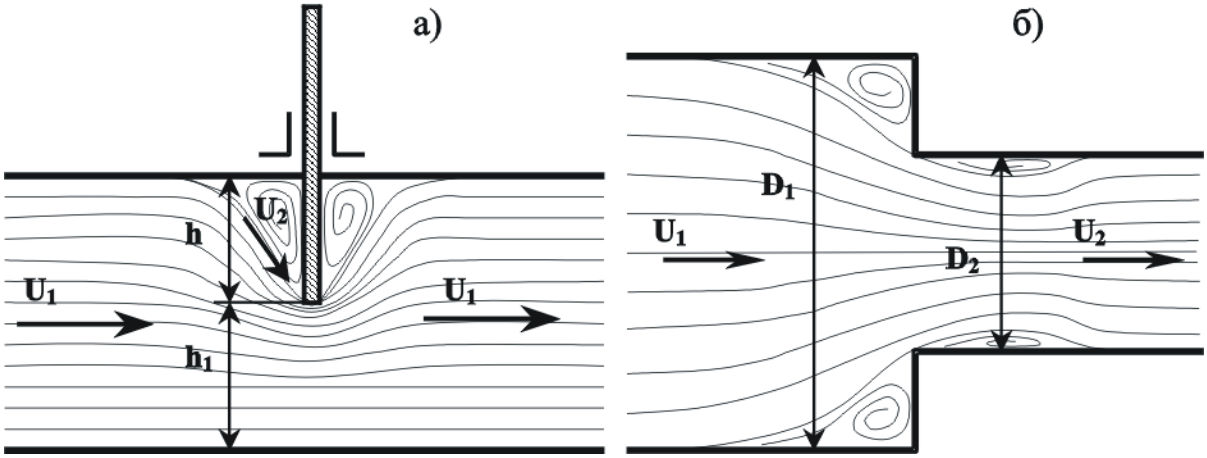


Рис. 3.1. Деформация потока и образование водоворотных зон

Формулу для расчета местных потерь ввел в практическую гидравлику немецкий гидравлик Вейсбах:

$$\mathbf{h_м = \varsigma \frac{U^2}{2g}}, \qquad (3.1)$$

где: $\mathbf{h_м}$ – местные потери энергии в сечении, м;

ζ - коэффициент местных потерь,

U – средняя скорость за сечением, вызвавшим потери энергии, м/с :

- для рис.3.1а $\mathbf{h_м = \zeta \frac{U_1^2}{2g}}$, где ζ выбираем из п.10, 11 таблицы 3.1;

- для рис.3.1б $\mathbf{h_м = \zeta \frac{U_2^2}{2g}}$, где ζ выбираем из п.5 таблицы 3.1.

Если воспользоваться формулой 1.4, то для местных потерь можно написать:

$$\mathbf{h_м = \zeta_м \frac{0.08Q^2}{d^4}}. \qquad (3.2)$$

На величину коэффициента местных потерь ζ существенное влияние оказывает режим движения жидкости. Например, при ламинарном движении жидкости $\mathbf{\zeta \approx \frac{A}{Re}}$ и изменяется в несколько раз (формула 3.5). При турбулентном режиме движения жидкости величина ζ изменяется настолько незначительно, что ее обычно принимают постоянной. Ниже приводится учебная таблица 3.1. коэффициентов местных потерь для турбулентного режима движения жидкости для часто встречающихся в практических расчетах видов местных потерь. В тех случая провести практические расчеты, обращаются к подробным атласам, позволяющим определить коэффициент ζ для конкретной задачи. Значения коэффициентов местных сопротивлений обычно определены опытным путем и только для внезапного расширения трубопровода коэффициент ζ удается определить теоретически.

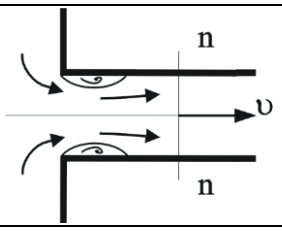
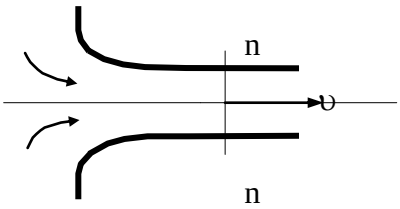
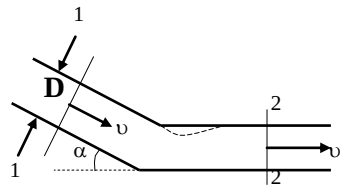
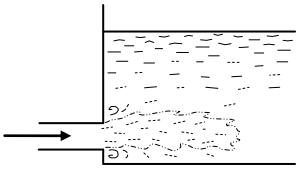
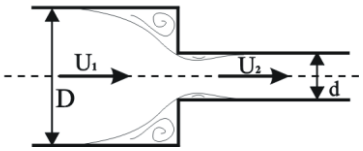
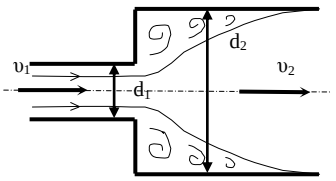
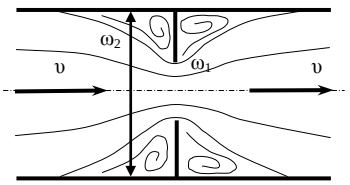
При ламинарном движении обычно местные потери незначительны по сравнению с потерями по длине. И, самое главное, что закон сопротивлений в этом случае является очень сложным и исследован в меньшей степени, чем при турбулентном режиме. При ламинарном движении потерю напора $\mathbf{h_м}$ следует рассматривать как сумму:

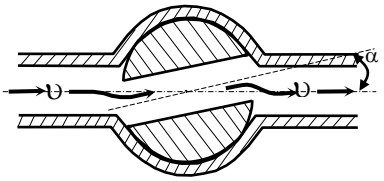
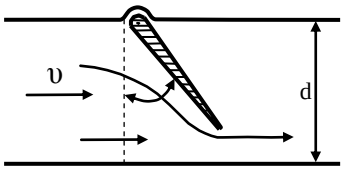
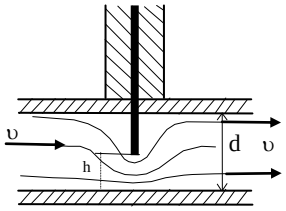
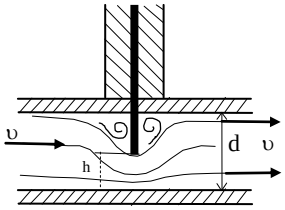
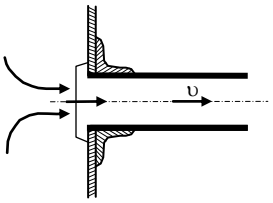
$$\mathbf{h_м = h_{тр} + h_{вихр}}, \qquad (3.3)$$

где: $\mathbf{h_{тр}}$ - потери напора, обусловленные непосредственным действием сил трения, пропорциональные первой степени скорости и вязкости, м;

$\mathbf{h_{вихр}}$ - потери, связанные с отрывом потока и вихреобразованием в самом местном сопротивлении или за ним, пропорциональные квадрату скорости, м.

Таблица 3.1

№	Вид местных потерь	Рисунок	ζ-коэффициент местных потерь	Примечания
1	2	3	4	5
1	Вход в трубу с острой кромкой		0.5	
2	Плавное сопряжение труб		0.08-0.2	
3	Поворот трубы		ζ=0,5+0,3sinα	Если $d_1=d_2$
4	Истечение под уровень		1.0	Из теоремы Борда, принимая $U_2=0$
5	Внезапное сужение трубы		$\zeta = 0.5(1-\frac{d^2}{D^2})$	По данным ЦАГИ
6	Внезапное расширение трубы		$\zeta = (\frac{d_2}{d_1}-1)^2$	Теорема Борда
7	Диафрагма в постоянном потоке		ζ 245 18.4 2.0 $\frac{\omega_1}{\omega_2}$ 0.1 0.3 0.6	По исследованиям Идельчика

8	Пробковый кран		ζ α 0.05 5˚ 0.3 10˚ 0.75 15˚ 3.1 25˚ 9.7 35˚	
9	Шарнирный клапан		ζ α 1.7 70˚ 6.6 50˚ 14 40˚ 30 30˚ 62 20˚	
10	Задвижка в постоянном потоке (малые трубы)		ζ h/d 0.6 2/3 2.1 1/2 5.5 3/8 17 1/4 43 13/72	По Вейсбаху d<0.5м
11	Задвижка в постоянном потоке (большие трубы)		ζ h/d 0.8 2/3 3.3 1/2 8.7 3/8 22.7 1/4 41.2 13/72	По Кихлингу d>0.5м
12	Предохранительная сетка		5-10	От размера ячеек

Учитывая закон сопротивления при ламинарном течении с поправкой на начальный участок, можно написать:

$$\mathbf{h_м = (\frac{A}{Re} + B)\frac{U^2}{2g}}, \qquad (3.4)$$

здесь **A** и **B** константы, зависящие от формы местного сопротивления.

Если уравнение 3.4 разделить на скоростной напор, то получим выражение для коэффициента местных потерь:

$$\mathbf{\xi = \frac{A}{Re} + B}. \qquad (3.5)$$

В местных сопротивлениях, где имеется узкий канал, длина которого значительно превышает его поперечный размер, с плавными очертаниями входа и выхода (как показано, например, на рисунке в таблице 3.1-2), а скорости

малы, потеря напора определяется в основном трением и закон сопротивления близок к линейному. В этом случае $\mathbf{B} << \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{Re}}$.

Если в местном сопротивлении трение сведено к минимуму, например, в случае входа с острой кромкой, когда имеются отрывы потока, становится существенным влияние второго слагаемого в формуле 3.4. При широком диапазоне изменения числа Рейнольдса (от10 до 1000) возможно изменение коэффициента ζ в 5-10 раз. Например, при внезапном расширении потока при Re<10:

$$\xi = \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{Re}}. \qquad (3.6)$$

Эту формулу можно положить в основу расчетов местных потерь при ламинарном движении. При необходимости уточнения формулы 3.6 величину коэффициента ζ определяют на основании серии проведенных опытов.

2. Цели работы

1.Определение опытным путем коэффициента местных сопротивлений пробкового крана в зависимости от угла его открытия в турбулентном режиме.

2.Определение опытным путем влияния числа Рейнольдса на величину ζ в ламинарном режиме движения.

3.Сравнение данных, приведенных в пункте 8 таблицы 3.1 с полученными опытным путем.

4. Построение линий напоров на горизонтальном участке трубопровода.

3. Описание установки и порядок проведения опытов

Работа выполняется на установке, схема которой представлена на рис.3.2

Установка состоит из напорного бака 3 с переливным устройством 4, трубопровода 6, пробкового крана 7, угломера 13, вентиля 11, дифференциального пьезометра 8, мерного бака 9 с тастером 12 и краном 10.

Напорный бак и переливное устройство обеспечивают установившееся движение воды на горизонтальном участке трубопровода 6. Подача воды в напорный бак осуществляется по трубе 1 с краном 2.

Пробковый кран 7 и угломер 13 установлены для изучения зависимости **ζ=f(α)**, от угла закрытия пробкового крана.

Дифференциальный пьезометр позволяет определить величину местных потерь напора на пробковом кране.

Мерный бак 9 и тастер 12 используются для определения расхода воды в трубопроводе, кран 10 , предназначен для слива воды из мерного бака в бассейн лаборатории.

Исходное положение установки: вентили 2 и 11 закрыты. Кран 7 открыт полностью, на угломере установлен угол, соответствующий максимально возможному углу для проведения исследований.

Перед проведением опытов необходимо выполнить следующие действия:

-проверить отсутствие воздушных пробок в соединительных шлангах дифференциального пьезометра. Для этого следует открыть вентили 2 и 11. Через 2 минуты можно закрыть вентиль 11 и следует убедиться в том, что уровни воды в трубках дифференциального пьезометра находятся на одинаковой отметке;

-вентилем 2 отрегулировать подачу воды в бак 3 таким образом, чтобы при максимальном угле закрытия крана и полностью открытом вентиле 11 наблюдался небольшой слив воды по трубе 5.

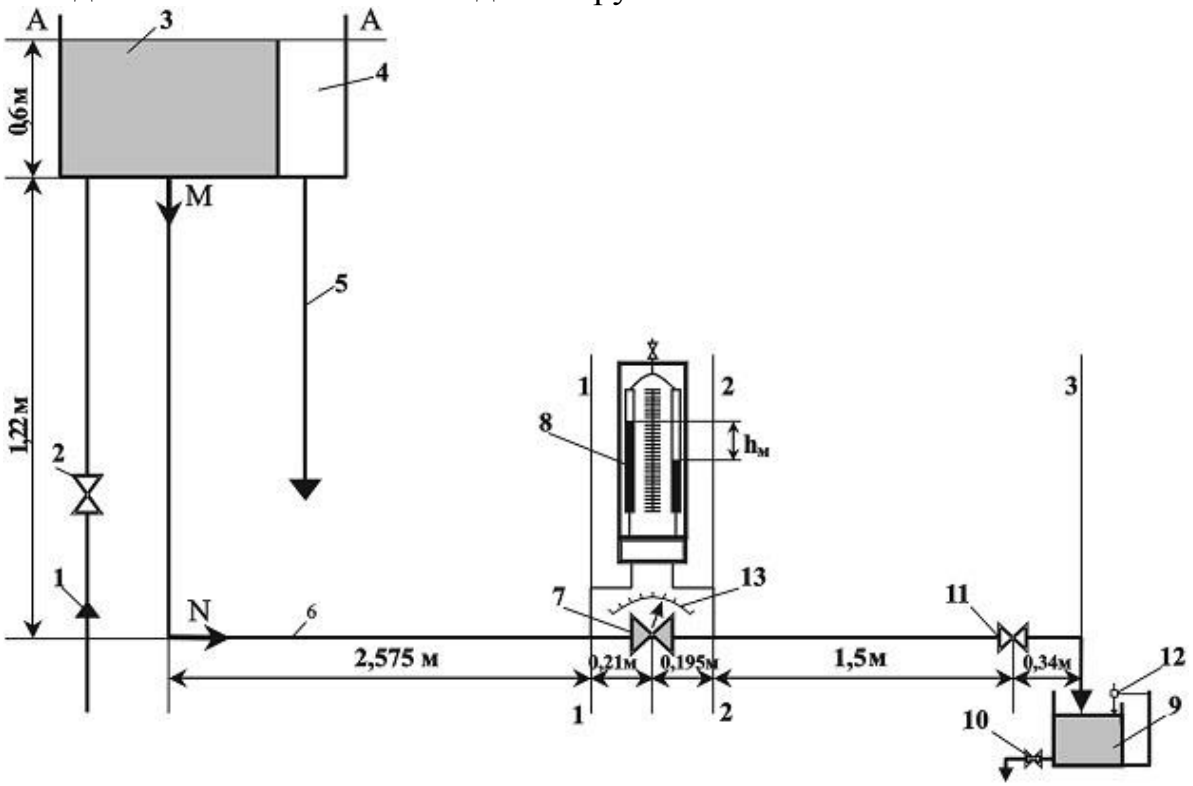


Рис.3.2 Схема опытной установки

Лабораторная работа разбивается на две части. В первой части проводятся исследования зависимости коэффициента местных сопротивлений пробкового крана в зависимости от угла его открытия в турбулентном режиме. Во второй части определяется влияние числа Рейнольдса на величину ζ в ламинарном режиме движения. В первой части расход определяется геометрическим способом, во второй – весовым.

Проведение опытов рекомендуется проводить в следующем порядке:

1 часть работы

- установить максимальный угол α закрытия крана,
- определить отметки уровней дифференциального пьезометра h_1 и h_2,
- записать отметку уровня воды ∇_1 по тастеру перед замером расхода,
- записать отметку уровня воды ∇_2 по тастеру после замера расхода,
- температуру воды в мерном баке, t =……,

- по графику 1.4 определить $\boldsymbol{\nu_{воды}}$ =……$\frac{\mathbf{м^2}}{\mathbf{с}}$,
- последовательно повторить замеры, уменьшая угол α закрытия крана.
- занести опытные данные в табл.3.2

Таблица 3.2(опытные данные)

№	**α**, угол закрытия крана	$\mathbf{h_1}$, м	$\mathbf{h_2}$, м	∇_2, м	∇_1, м	**τ**, с
1	30°					
2	25°					
3	20°					
4	15°					
5	10°					
6	0°					

2 часть работы

- установить максимальный угол **α** закрытия крана,
- уменьшить до минимального расход воды, регулируя его вентилем 11,
- определить отметки уровней дифференциального пьезометра h_1 и h_2,
- записать вес пустой мерной емкости $\mathbf{G_1}$ перед замером расхода,
- записать вес мерной емкости $\mathbf{G_2}$ после замера расхода,
- температуру воды в мерном баке.
- последовательно повторить замеры, увеличивая расход воды с помощью вентиля 11.
- занести опытные данные в табл.3.3

Таблица 3.3 (опытные данные при α=30°)

№	$\mathbf{h_1}$, м	$\mathbf{h_2}$, м	$\mathbf{G_1}$, Н	$\mathbf{G_2}$, Н	**τ**, с
1					
2					
3					
4					
5					
6					

После окончания опытов закрыть вентили 11 и 2, угол α закрытия крана установить минимальный. Открыть вентиль 10 и полностью слить воду из бака 9.

4. Методика обработки опытных данных

Опытные данные таблицы 3.2 обрабатываются по формулам:

- расход Q, измеренный геометрическим методом:

$$\mathbf{Q = \frac{\Omega(\nabla_2 - \nabla_1)}{\tau}}, \qquad (3.7)$$

где: **Ω** – площадь мерного бака **(Ω**=0,46 м^2),

- величина $\mathbf{h_м}$:

$$\mathbf{h_м = (h_1 - h_2) - h^*} \qquad (3.8)$$

где: - h* - поправочная величина, вычисляется как разность h_1-h_2 при α=0° для турбулентного режима,

- величина U определяется по формуле 1.4 (диаметр трубы d= 5 см)
- число Re определяется по формуле 1.2.
- величина ζ определяется из формулы 3.2,

Результаты расчетов заносятся в таблицу 3.4.

Таблица 3.4

№	**α**, угол закрытия крана	**Q,** $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$	$\mathbf{h_м}$**,** м	**U**, м/с	**Re**	**ζ**
1	30°					
2	25°					
3	20°					
4	15°					
5	10°					
6	0°					

Опытные данные таблицы 3.3 обрабатываются следующим образом:

- расход Q, измеренный весовым методом, по формуле 1.3,
- величина $\mathbf{h_м}$

$$\mathbf{h_м = (h_1 - h_2)}$$

- величины U, Re и ζ определяются аналогично, что и данные в табл. 3.4.

Результаты расчетов заносятся в таблицу 3.5.

Таблица 3.5

№	**Q,** $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$	$\mathbf{h_м}$**,** м	**U**, м/с	Re	ζ
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Для построения линий напоров необходимо знать удельную энергию давления. Поскольку дифференциальные пьезометры показывают относительные значения, нужно определить какую величину показал бы обычный пьезометр установленный в соответствующем сечении.

Этот расчет можно выполнить, если воспользоваться размерами опытной установки, представленной на рисунке 3.2 и уравнением 2.1. Расчетные формулы следует вывести самостоятельно и результат расчета представить ниже

$$\ldots\ldots = \frac{\mathbf{P_{изб1}}}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} + \left(\frac{\lambda l}{d} + \ldots\ldots + \ldots\ldots\right)\frac{U^2}{2g},$$

$$\mathbf{h_{изб1}} = \ldots\ldots - \left(\ldots\ldots + \ldots\ldots\right)\frac{U^2}{2g},$$

Результаты расчетов занести в таблицу 3.6.

На основании результатов расчетов, представленных в таблицах 3.4 и 3.5 строятся графики зависимостей $\zeta = f(\alpha)$ на рисунке 3.3 и $\zeta = f(\mathrm{Re})$ на рисунке 3.4.

Таблица 3.6

№	$\lambda(R_e)$	$\frac{\lambda L}{d}$	$\frac{U^2}{2g}$, м	$h_{изб1}$, м	$h_{изб2}$, м	$P_{изб1}$, Па	$P_{изб2}$, Па
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Для опытных значений ζ при различных углах закрытия крана α вычислить погрешность проведения опытов η по аналогии с формулой 2.18.. Результаты расчетов занести в таблицу 3.7

Если погрешность превышает 10%, следует повторить эту группу опытов.

Таблица 3.7

№ опыта	α	ζ опытное значение	ζ табличное значение	η, %
1				
2				
3				
4				
5				
6				

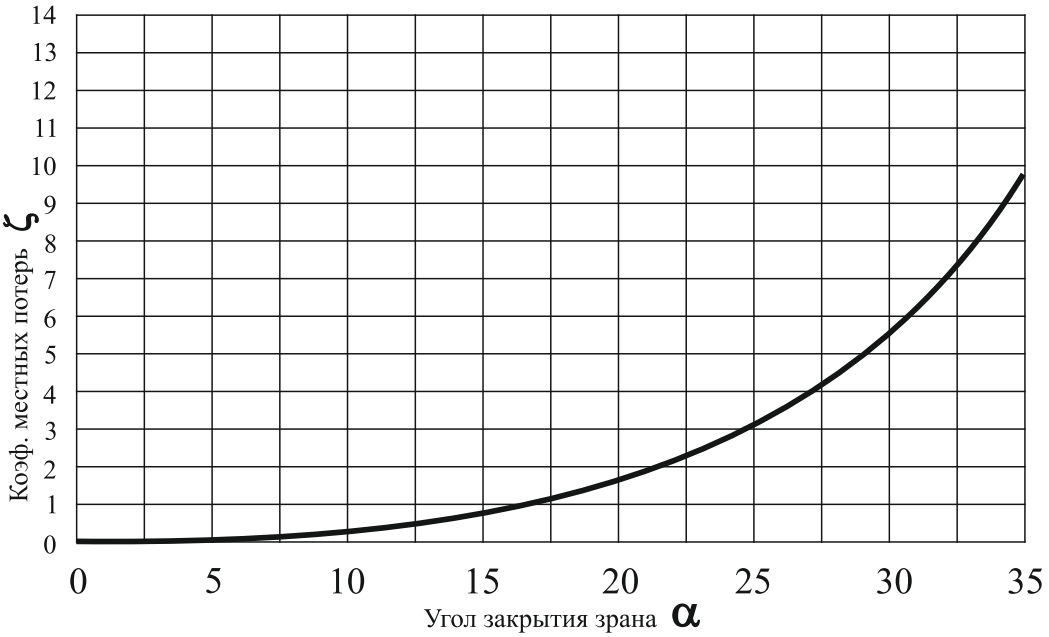


Рис. 3.3 Табличная и экспериментальная зависимости ζ= *f*(α)

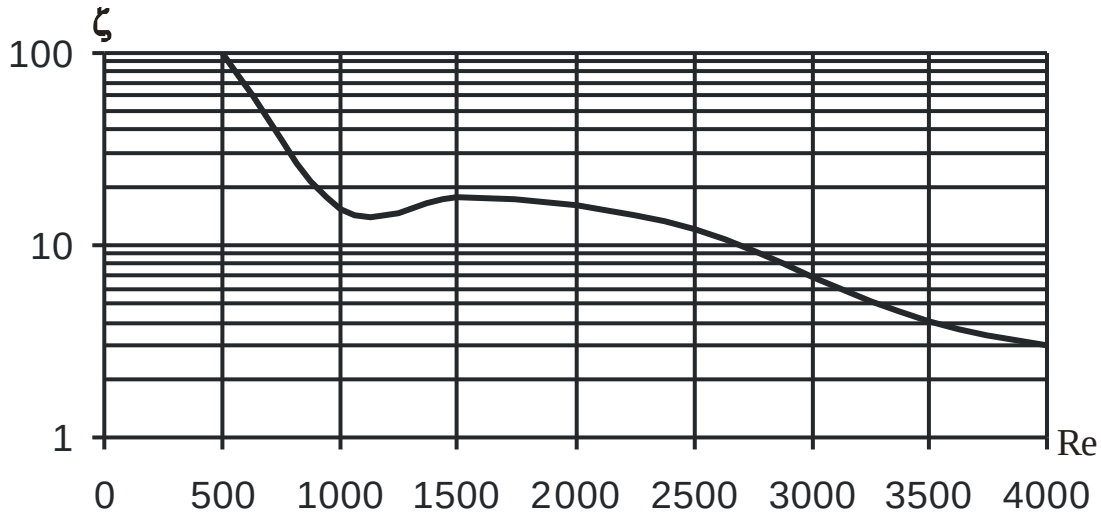


Рис.3.4 Табличная (по данным Никурадзе) и экспериментальная зависимости ζ= *f*(Re) для α=30˚

5. Выводы по проделанной работе и результатам расчетов таблиц

6. Список вопросов к защите лабораторной работы.

1. Какие способы определения расхода жидкости вам известны?
2. Где возникают местные потери? С какими физическими явлениями они связаны?
3. Как влияет режим движения жидкости на коэффициент местных потерь?
4. Какими способами получены значения коэффициентов местных потерь?
5. Сравните полученные вами опытные значения для коэффициента местных потерь пробкового крана и представленные в таблице 3.1 пункт 8. Объясните причины расхождений значений.
6. По опытным данным (опыт №…..и опыт №…..) построить линии пьезометрических напоров на рис.3.5. (номера опытов назначает преподаватель). Объяснить полученные графики.
7. По опытным данным (опыт №…...) построить линию полных напоров на рис.3.5. (номер опыта назначает преподаватель). Объяснить полученный график.
8. Пользуясь результатами проведенных расчетов и геометрическими размерами, указанными на рис.3.5, вычислить давление в точке **А** трубопровода (местоположение точки назначает преподаватель).
9. Пользуясь результатами проведенных расчетов и геометрическими размерами, указанными на рис.3.5, вычислить полную удельную энергию в точке **В** трубопровода (местоположение точки назначает преподаватель).
10. Пользуясь таблицей 3.1 и рисунком 3.2 вывести зависимость, связывающую расход Q и коэффициент местных потерь ζ.

Работа выполнена _____20_ __г. _____

(подпись преподавателя)

Работа защищена _____20_ __г. _____

(подпись преподавателя)

Лабораторная работа №4
Изучение уравнения Бернулли

1.Основные положения и расчетные зависимости

При проведении трех предыдущих лабораторных работ мы познакомились:

- с двумя режимами движения жидкости: ламинарным и турбулентным,
- с двумя видами потерь энергии: потерями по длине и местными потерями,
- исследовали влияние ламинарного и турбулентного движения на коэффициенты ζ и λ.

Работа, которую предстоит выполнить теперь, является обобщением трех предыдущих работ и является графической иллюстрацией закона сохранения энергии, закона Бернулли (2.1).

Напомним, что уравнение Бернулли выведено при соблюдении следующих условий:

- между двумя сечениями трубопровода А-А и В-В характер движения жидкости установившийся,
- из внешних массовых сил действует только сила тяжести,
- выполнено условие Q=const , то есть на участке трубопровода между двумя сечениями А-А и В-В нет подвода и отвода жидкости,
- на участке трубопровода между двумя сечениями А-А и В-В нет дополнительного подвода и отвода энергии, то есть нет насосов и турбин,
- в окрестности сечений А-А и В-В характер движения жидкости плавно изменяющийся (на участке трубопровода между двумя сечениями возможно нарушение этого условия),
- между двумя сечениями трубопровода А-А и В-В изменение внешнего давления и температуры таковы, что можно принять условие ρ=const.

Если выполнены указанные выше условия, то уравнение Бернулли между двумя произвольными сечениями А-А и В-В запишется:

$$z_A + \frac{p_A}{\rho g} + \frac{U^2{}_A}{2g} = z_B + \frac{p_B}{\rho g} + \frac{U_B^2}{2g} + h_{wA-B}, \qquad (4.1)$$

где: **z** называется удельной энергией положения (см. формулу 2.1 и пояснения к ней), м;

$\frac{p}{\rho g}$ - называется удельной энергией давления (см. формулу 2.1 и пояснения к ней), м;

$\frac{U^2}{2g}$ - называется удельной кинетической энергией или скоростным напором, м;

$\mathbf{z+\frac{p}{\rho g}+\frac{U^2}{2g}}$ называется полной удельной энергией сечения или полным напором Н, м;

$\mathbf{h_{w\ A\text{-}B}}$ - общие потери энергии на участке трубопровода между двумя сечениями А-А и В-В, м;. Они складываются из потерь по длине (2.7) и местных потерь (3.1).

Часто вместо суммы $\mathbf{\frac{\lambda L}{d}+\zeta}$ пользуются выражением $\mathbf{\zeta_{системы}}$ и тогда потери энергии можно выразить формулой:

$$\mathbf{h_w=\zeta_{системы}\frac{U^2}{2g}}. \qquad (4.2)$$

Вычислим $\mathbf{\zeta_{системы}}$ по результатам проведенных ранее опытов.

Рассмотрим рис.4.1, представляющий собой схему лабораторной работы 4 и напишем уравнение Бернулли для трех пар сечений А-А и 1-1 , 1-1 и 36-36, А-А и 36-36. Выберем плоскость сравнения О-О по оси учебного трубопровода.

1. Сечения А-А и 1-1.

$$\mathbf{z_A+\frac{p_A}{\rho g}+\frac{U_A^{\ 2}}{2g}=z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{U_1^{\ 2}}{2g}+h_{wA-1}} \qquad (4.3)$$

с условиями:

Z_A=3,15м , $p_A= p_o$, U_A=0;

Z_1=0, $p_1= p_o+\rho g h_1$, $U_1=4Q/\pi d^2$=0,39 м/с;

где: h_1 –показания пьезометра №1, которые при расходе Q=7.65 10^{-4} $м^3/с$ (по результатам опытов, проведенных ранее) составляют 2.86 м;

d_1 =5 см.

После подстановки значений Z, p, U и d в уравнение Бернулли, получим:

$$\mathbf{3.15=2.86+\frac{U^2}{2g}(\zeta_M+\zeta_N+\zeta_R+\frac{\lambda L_{A-1}}{d}+1)}. \qquad (4.4)$$

Обозначим: $\mathbf{\zeta_M+\zeta_N+\zeta_R+\frac{\lambda L_{A-1}}{d}+1=\zeta_{системы1}}$.

Тогда уравнение 4.4 преобразуется к виду:

$$\mathbf{\zeta_{системы1}=\frac{3{,}25-2{,}86}{U^2}2g=51{,}3}, \qquad (4.5)$$

или, воспользовавшись данными таблицы 3.1 и рис.4.1,получим:

$\mathbf{\zeta_N=35.1}$,что соответствует углу закрытия крана 40º (в проведенном ранее опыте).

2. Сечения 1-1 и 36-36 .

$$\mathbf{z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{U_1^{\ 2}}{2g}=z_{36}+\frac{p_{36}}{\rho g}+\frac{U_{36}^{\ 2}}{2g}+h_{w1-36}} \qquad (4.6)$$

с условиями:

$Z_1=0$, $p_1= p_o+\rho g h_1$, $U_1=4Q/\pi d^2=0{,}39$ м/с;

$Z_{36}=0$, $p_{36}= p_o+\rho g h_{36}$, $U_{36}= U_1=4Q/\pi d^2=0{,}39$ м/с;

где: h_{36} –показания пьезометра №36, которые при расходе $Q=7.65\ 10^{-4}$ м^3/с составляют 1.23 м.

После подстановки значений Z, p, U и d в уравнение Бернулли, получим:

$$\mathbf{2.86 = 1.23 + \frac{U^2}{2g}\left(\sum\zeta + \sum\frac{\lambda L}{d}\right)}. \qquad (4.7)$$

Обозначим: $\sum\zeta + \sum\frac{\lambda L}{d} = \zeta_{\text{системы 2}}$.

Тогда уравнение 4.8 преобразуется к виду:

$$\zeta_{\text{системы 2}} = \frac{2.86 - 1.23}{U^2}2g = 214.3. \qquad (4.8)$$

3. Сечения А-А и 36-36.

$$\mathbf{z_A + \frac{p_A}{\rho g} + \frac{U_A^{\,2}}{2g} = z_{36} + \frac{p_{36}}{\rho g} + \frac{U_{36}^{\,2}}{2g} + h_{wA-36}} \qquad (4.9)$$

с условиями

$Z_A=3{,}15$м , $p_A=p_o$, $U_A=0$

$Z_{36}=0$, $p_{36}= p_o+\rho g h_{36}$ $U_{36}=0{,}39$ м/с;

После подстановки значений Z, p, U и d в уравнение Бернулли, получим:

$$\mathbf{3.15 = 1.23 + \frac{U^2}{2g}\left(\sum\zeta + \sum\frac{\lambda L}{d} + 1\right)} \qquad (4.10)$$

Обозначим: $\sum\zeta + \sum\frac{\lambda L}{d} + 1 = \zeta_{\text{системы 3}}$.

Тогда уравнение 4.10 преобразуется к виду:

$$\zeta_{\text{системы 3}} = \frac{3{,}25 - 1{,}23}{U^2}2g = 2265{,}6. \qquad (4.11)$$

Если расчеты проведены верно, то:

$$\zeta_{\text{системы 1}} + \zeta_{\text{системы 2}} = \zeta_{\text{системы 3}}.$$

Проверим проведенные выше расчеты: 51,3+214,3=265,6 и вычислим ошибку расчетов $\eta = \frac{265{,}6 - 265{,}6}{265{,}6} \bullet 100\% = 0\%$.

Точно также, выполнив опыты и проведя необходимые расчеты, вы сможете написать в числах уравнение Бернулли для любой указанной пары сечений и вычислить значения λ ,ζ, h_w.

2. Цели работы

-для двух расходов Q_{max} и Q_{min} провести исследования изменения пьезометрического и полного напоров по длине учебного трубопровода;

-научиться определять аналитически и графическим способом любые параметры движущейся жидкости (U, P, z);

-научится опытным путем определять величины λ и ζ.

3. Описание установки и порядок проведения опытов

Схема опытной установки представлена на рис.4.1. Она состоит из напорного бака 3 с переливным устройством 4 и водомерной трубкой 18, учебного трубопровода 9, на котором последовательно расположены задвижка типа Лудло 11, расходомер Вентури 12, регулировочный вентиль 13 и поворотное колено 14.

Переливное устройство 4 обеспечивает установившийся режим движения жидкости в учебном горизонтальном трубопроводе. Трубопровод составлен из труб двух диаметров: трубы диаметра 2 см (участок 10) и трубы диаметра 5 см (остальные участки учебного трубопровода).

Излишки воды, поступающей в напорный бак по трубопроводу 1, снабженному краном 2, сливаются через переливное устройство по трубе 6 в бассейн лаборатории (на рисунке не указан).

На горизонтальном участке учебного трубопровода, протяженностью 26.2 м, установлены 36 пьезометров (все расстояния между пьезометрами указаны на рис.4.4). Длина исследуемой с их помощью части трубопровода равна 22 м.

Протяженность участка 10 составляет 2.5 м. На нем располагаются пьезометры №4 - №9. Остальные 30 пьезометров расположены с разной частотой по трубопроводу диаметра 5 см.

Все пьезометры снабжены краниками 5 и с помощью соединительных шлангов 7 соединены с трубопроводом.

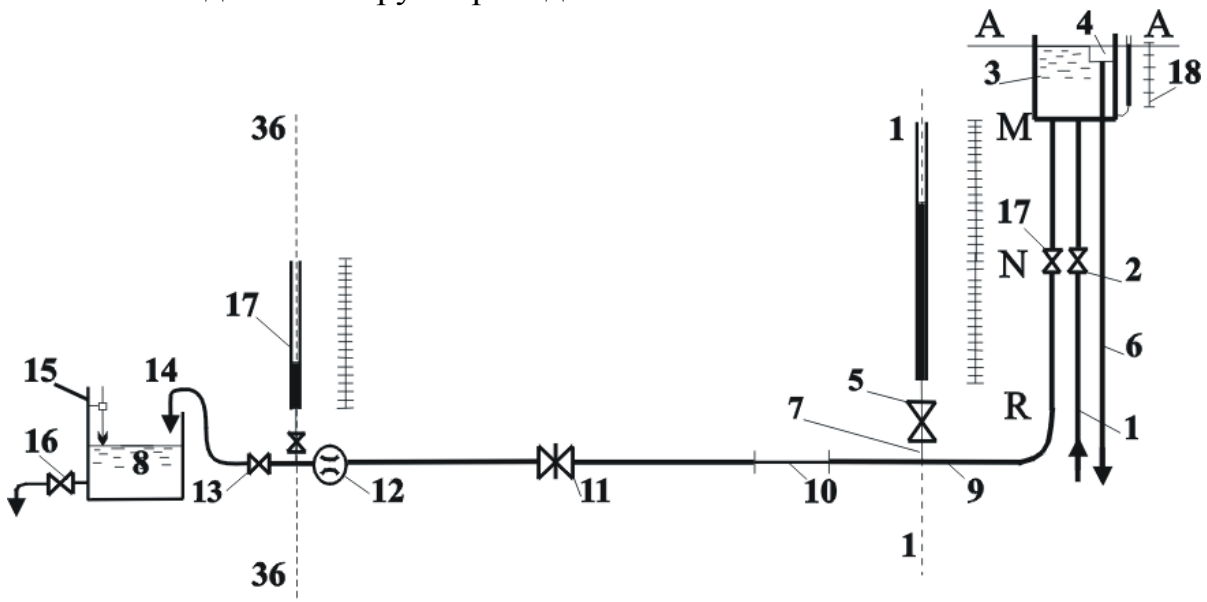


Рис. 4.1 Схема опытной установки

Через поворотное колено 14 вода поступает в мерный бак 8. Бак снабжен тастером 15 , предназначенным для измерения уровня воды в баке. Из мерного бака через кран 16 вода сливается в бассейн лаборатории.

На трубопроводе установлен кран 17 для подачи воды и возможности регулировки показаний пьезометров.

Перед началом работы и после ее завершения должны быть закрыты краники 5 пьезометров, регулировочный кран 13, и кран 2 подачи воды в напорный бак. Кран 17 открыт.

Дальнейшая последовательность работ следующая:

1.Открыть кран 2 и заполнить напорный бак. Его наполнение фиксирует водомерная трубка 18;

2.Отрегулировать подачу воды так, чтобы по трубе 6 наблюдался небольшой слив воды;

3.С помощью регулировочного крана 13 установить расход Q_{min}, который после открытия краником 5 пьезометра №36 можно отрегулировать для проведения первого опыта. Это означает, что следует добиться максимального значения пьезометра №36 - h_{36};

4.Открыть все краники пьезометров;

5.Убедиться в наличии слива воды по трубе 6;

6.Записать в таблицу 4.1 показания пьезометров;

Таблица 4.1

№ пьезометра	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{p}{\rho g}$,м при Q_{min}								
$\frac{p}{\rho g}$,м при Q_{max}								
№ пьезометра	9	10	11	12	13	14	15	16
$\frac{p}{\rho g}$,м при Q_{min}								
$\frac{p}{\rho g}$,м при Q_{max}								
№ пьезометра	17	18	19	20	21	22	23	24
$\frac{p}{\rho g}$,м при Q_{min}								
$\frac{p}{\rho g}$,м при Q_{max}								
№ пьезометра	25	26	27	28	29	30	31	32
$\frac{p}{\rho g}$,м при Q_{min}								
$\frac{p}{\rho g}$,м при Q_{max}								
№ пьезометра	33	34	35	36				
$\frac{p}{\rho g}$,м при Q_{min}								
$\frac{p}{\rho g}$,м при Q_{max}								

7.Провести замеры расхода. Для этого следует закрыть кран 16 и повернуть в бак 8 поворотное колено 14.

- записать отметку уровня воды ∇_1 по тастеру перед замером расхода;

- записать отметку уровня воды ∇_2 по тастеру после замера расхода;

При необходимости проводить слив воды из бака 8 открытием крана 16.

Измерение расхода провести 5 раз, записав в таблицу 4.2 три наиболее близких друг другу значения; и вычислить по ним среднее значение расхода Q. **Все дальнейшие расчеты вести по средним значениям Q_{min} и Q_{max} .**

8. Повторить пункты 3 - 7, установив значения Q_{max} (это означает, что с помощью регулировочного крана 13 необходимо добиться минимального значения пьезометра №36 - h_{36}).

После окончания опытов измерить температуру воды , результат записать в таблицу 4.2.

9.После проведения всех замеров следует в первую очередь закрыть все краники пьезометров. Затем открыть кран 16 для слива воды в бассейн лаборатории, закрыть регулировочный кран 13, закрыть кран 2.

Таблица 4.2

Среднее значение $\mathbf{Q_{min}}$**=…….,** $м^3/с$ t=…….ºC			Среднее значение $\mathbf{Q_{max}}$**=……,** $м^3/с$; t=…….ºC		
∇_2, м	∇_1, м	**τ,** с	∇_2, м	∇_1, м	**τ,** с

4. Методика обработки опытных данных

Обработку полученных опытных данных предлагается проводить в следующей последовательности:

1. На рисунке 4.4 построить линию пьезометрического напора для расхода Q_{min};

2. На рисунке 4.4 построить линию пьезометрического напора для расхода Q_{max};

3. По данным таблицы 4.2 вычислить значения $Q_{min\ и}$ Q_{max} по формуле 3.7 (площадь мерного бака Ω=0.243 $м^2$) и занести их в таблицу 4.3 .

Значения в таблице 4.3 вычисляются:

U- по формуле 1.4;

Re -по формуле 1.2;

λ -по формулам 2.12 и 2.14;

пьезометрический уклон $J_P=\frac{h_L}{L}$ по формуле $J_P=\frac{\lambda}{d}\frac{U^2}{2g}$. (4.12)

4. Пользуясь данными таблицы 4.3 на рисунке 4.4 построить линию полного напора для расхода $Q_{min;}$

5.Пользуясь данными таблицы 4.3 на рисунке 4.4 построить линию полного напора для расхода Q_{max}

Таблица 4.3

Диаметры трубопровода	**Q,** $м^3/с$	**U,** м/с	**Re**	$\frac{U^2}{2g}$, м	λ по формуле 2.12	λ по формуле 2.14	J_P для λ по ф. 2.12	J_P для λ по ф. 2.14
d=2см	Q_{min}							
	Q_{max}							
D=5см	Q_{min}							
	Q_{max}							

6. Определить по графику 4.4. и записать в таблицу 4.4. следующие величины:

h_w - потери напора между сечениями 1 и 36, которые определяются по формулам 4.1-4.11;

$h_{вс}$ - потери напора на внезапное сужение трубопровода ;

$h_{вр-}$ - потери напора на внезапное расширение трубопровода;

$h_з$ - потери напора на задвижке;

$h_{р-}$ - потери напора на расходомере;

Таблица 4.4

Расходы	h_w, м	ζ системы	$h_{вс}$, м	ζ внезапного сужения	$h_{вр}$, м	ζ внезапного расширения	$h_з$, м	ζ задвижки	$h_р$, м	ζ расходомера
Q_{min}, $м^3/с$										
Q_{max}, $м^3/с$										

На рисунке 4.2 рассмотрен пример графического определения величины потерь напора h_w и коэффициента местных потерь ζ в трубопроводе постоянного сечения. Пьезометрическая линия проходит через точки $а_1$, $а_2$, $а_3$ и $а_4$. Линия полного напора проходит через точки $в_1$, $в_2$, $в_3$ и $в_4$. В сечении N-N находится источник местных потерь .Их величину можно определить, продолжив линию полных напоров до вертикали N-N до значений $\mathbf{в_5}$ - справа от линии N-N и $\mathbf{в_6}$ - слева от линии N-N. Получим:

$$\mathbf{h_w= в_5- в_6.} \quad (4.13)$$

Расстояние $\mathbf{в_5 - а_5= в_6 – а_6}$ и равно скоростному напору

$$\text{Тогда } \zeta = \frac{\mathbf{в_5 - в_6}}{\mathbf{в_5 - а_5}} \qquad (4.14)$$

На рисунке 4.3 рассмотрен пример графического определения величины потерь напора h_w и коэффициента местных потерь ζ в трубопроводе переменного сечения. Пьезометрическая линия проходит через точки $а_1$, $а_2$, $а_3$ и $а_4$. Линия полного напора проходит через точки $в_1$, $в_2$, $в_3$ и $в_4$. В сечении N-N находится источник местных потерь .Их величину можно определить, продолжив линию полных напоров до вертикали N-N. Получим:

$$\mathbf{h_w = в_5 - в_6.} \qquad (4.15)$$

Расстояния $\mathbf{в_5 - а_5}$ равно скоростному напору в сечении большего диаметра Расстояния $\mathbf{в_6 - а_6}$ равно скоростному напору в сечении меньшего диаметра

$$\text{Тогда: } \zeta. = \frac{\mathbf{в_5 - в_6}}{\mathbf{в_6 - а_6}} \qquad (4.16)$$

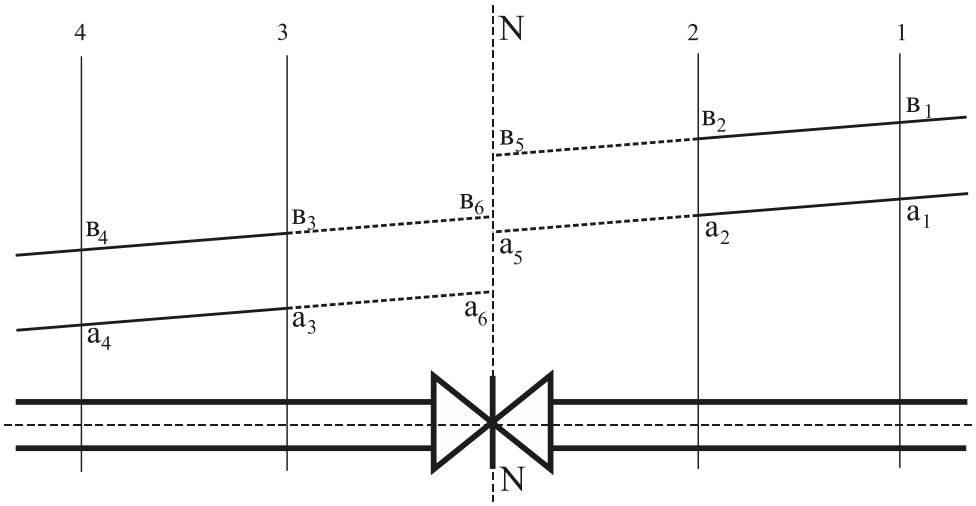


Рис. 4.2 Пример графического определения h_M и ς для трубопровода постоянного сечения.

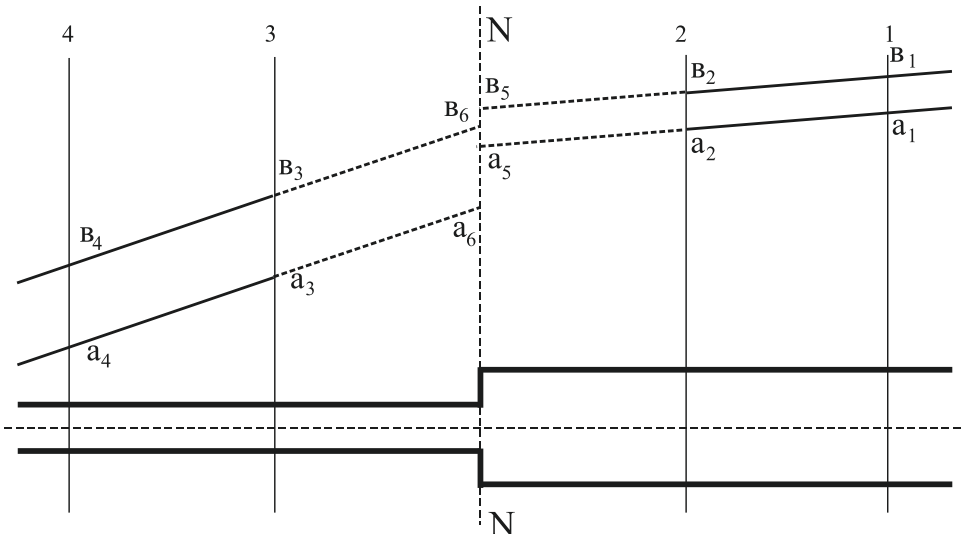


Рис. 4.3 Пример графического определения h_M и ς для трубопровода переменного сечения.

5. Выводы по проделанной работе и результатам расчетов таблиц

_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____

6. Список вопросов к защите лабораторной работы.

1. По графику 4.4 определить полный напор сечения №……..

……

2. Написать в числах уравнение Бернулли для пары сечений №……и №……. Все данные определять по графику 4.4.

……

……

……

3. Определить графическим способом значения коэффициента гидравлических сопротивлений трения на участках учебного трубопровода от пьезометра №……. до пьезометра №……участка малого диаметра и от пьезометра №……. до пьезометра №……участка большого диаметра .

……

……

……**.....**

4. Определить графическим способом значения коэффициента местных потерь на участках учебного трубопровода от пьезометра №……. до пьезометра №…… и от пьезометра №……. до пьезометра №……

……

……

……

5. Вычислить по формуле 4.2 $\zeta_{системы}$ для учебного трубопровода от сечения 1-1 до сечения 36-36

……

……

6. Вычислить по формуле 4.2 $\zeta_{системы}$ для учебного трубопровода от сечения А-А до сечения 1-1.

……

……

7. Вычислить по формуле 4.2 $\zeta_{системы}$ для учебного трубопровода от сечения А-А до сечения 36-36

……

……

8. Вычислить какой длиной трубопровода большего диаметра можно заменить задвижку, расположенную в учебном трубопроводе между сечениями 19 и 20, чтобы сохранить те же потери напора.

……

……

……

9. Как определить показание пьезометра №....., если он не был записан в ходе проведения опытов.

10. Вычислить J_P для двух участков трубопровода разного диаметра пользуясь графиком на рис. 4.4. Сравнить полученные значения с расчетами в таблице 4.3. Объяснить полученные расхождения.

……

……

……

Работа выполнена _____20__г. _____
(подпись преподавателя)

Работа защищена_____20__г. _____
(подпись преподавателя)

Для заметок

Дмитриева Ирина Николаевна
Григорьев Глеб Владимирович
Калистратов Александр Викторович

ГИДРАВЛИКА

Гидродинамика

Методические указания
к лабораторным работам для студентов дневной формы обучения
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»,
23.03.01 «Технология транспортных процессов»,
23.03.03 «Эксплуатация транспортных
и технологических машин и комплексов»,
350302 «Технология лесозаготовительных
и деревоперерабатывающих производств»