

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

«ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Биологический факультет
Кафедра биотехнологии

К.О. Камалов, Ф.И. Ахмаров

ПРИКЛАДНАЯ ГИДРАВЛИКА (Гидродинамика)

Методические указания
к лабораторным работам

Киров 2013

УДК 66.011(075.6)

К 18

Допущено методическим советом
Биологического факультета ФГБОУ ВПО «ВятГУ» в качестве
учебно-методического пособия для студентов направлений 240700.62
«Биотехнология», 241000.62 «Энерго и ресурсосберегающие процессы
в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии»,
240100.62 «Химическая технология»

Рецензенты:

Кандидат химических наук, доцент В.И.Вшивцев

Камалов К.О., Ахмаров Ф.И..

К18 Прикладная гидравлика (Гидродинамика): Методические указания
к лабораторным работам / К.О.Камалов и др. – Киров: Изд-во
ГОУ ВПО «ВятГУ», 2013. -28с.

УДК 66.011(075.6)

Учебное издание включает лабораторные работы по разделу прикладная гидравлика. В издании изложены требования техники безопасности, порядок выполнения работ, обработка экспериментальных данных и контрольные вопросы. Пособие по дисциплине «Прикладная гидравлика» предназначено для студентов направлений подготовки 240700.62 «Биотехнология», 241000.62 «Энерго и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», 240100.62 «Химическая технология»

Тех. редактор А.В. Куликова

ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2013

Содержание:

Введение	3
Лабораторная работа № 1. Демонстрация режимов течения жидкости. Определение критерия Рейнольдса.....	7
Лабораторная работа № 2. Демонстрация уравнения Бернулли. Построение линии полного гидродинамического напора. Определение величины потеряннного напора	10
Лабораторная работа № 4. Потери напора на трение. Определение коэффициента трения и абсолютной эквивалентной шероховатости.....	18
Приложение 1	22
Приложение 2	23
Приложение 3	24
Приложение 4	25
Приложение 5	26
Библиографический список.....	27

Введение

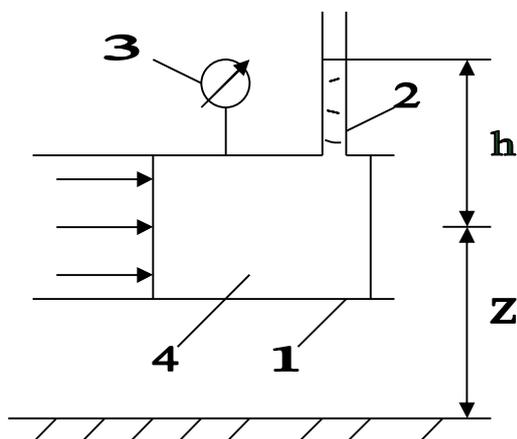
Гидравлика - это наука о законах равновесия и движения жидкостей. Она состоит из двух разделов: гидростатики и гидродинамики.

Гидростатика рассматривает законы равновесия жидкостей в состоянии покоя.

Гидродинамика изучает законы движения жидкостей.

Теоретические положения и уравнения гидродинамики основаны на главных физических законах: законе сохранения энергии и законе сохранения массы. Они сводятся к двум уравнениям: основному уравнению гидродинамики (уравнение Бернулли) и уравнению сплошности (неразрывности) потока.

Подсчитаем механическую энергию потока жидкости. Для этого выделим в потоке жидкости некий объем с массой m (кг) и весом mg (Н), движущийся по трубопроводу со скоростью w (м/с), и подсчитаем запас энергии, которым он обладает.



1 – трубопровод; 2 – пьезометр
3- манометр; 4 – выделенный объем жидкости; z – расстояние центра тяжести потока от плоскости сравнения; h – показание пьезометра, м

Рис.1

Механическая энергия потока жидкости складывается из:

- потенциальной энергии положения, равной

$$E_{n.n} = mgz ; [E_{n.n}]_{\text{СИ}} = [\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2 \cdot \text{м}] = [\text{Н} \cdot \text{м}] = [\text{Дж}];$$

- потенциальной энергии давления ($E_{n.д}$), равной

$$E_{n.д} = mgh ; [E_{n.д}]_{\text{СИ}} = [\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2 \cdot \text{м}] = [\text{Н} \cdot \text{м}] = [\text{Дж}];$$

- кинетической энергии (E_k), равной

$$E_k = \frac{mw^2}{2} ; [E_k] = [\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2] = [\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2 \cdot \text{м}] = [\text{Н} \cdot \text{м}] = [\text{Дж}].$$

Тогда полная энергия потока будет равна:

$$E_{\text{полн}} = E_{n.n} + E_{n.д} + E_k = mgz + mgh + \frac{mw^2}{2}.$$

Относя эту величину к единице веса (mg), получим значение полной удельной энергии потока ($e_{yд}$)

$$e_{y\partial} = \frac{E_{\text{полн}}}{mg} = \frac{mgz + mgh + \frac{mw^2}{2}}{mg} = z + h + \frac{w^2}{2g}.$$

Учитывая, что значения давления, выраженные в высоте столба жидкости h (м) и в Па (Н/м²), связаны между собой зависимостью $p = \rho gh$, то $h = p / \rho g$.

Следовательно, можно записать: $e_{y\partial} = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{w^2}{2g}$,

где z – геометрический напор, удельная потенциальная энергия положения, м;

$p / \rho g$ – пьезометрический напор, удельная потенциальная энергия давления, м;

$z + \frac{p}{\rho g}$ – статический напор, м;

$w^2/2g$ – динамический (скоростной) напор, удельная кинетическая энергия, м;

$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{w^2}{2g}$ – полный гидродинамический напор, полная удельная

энергия потока, м.

Для идеальной жидкости, т.е. жидкости, не обладающей вязкостью, из закона сохранения энергии следует, что величина полного гидродинамического напора для различных сечений потока остается величиной постоянной:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g}.$$

Это уравнение носит имя Бернулли (строгое доказательство этого равенства смотри в лекционном курсе). Из него следует, что при изменении поперечного сечения трубопровода (и соответственно скорости потока) происходит взаимное превращение энергии: при сужении трубопровода часть потенциальной энергии давления переходит в кинетическую, и, наоборот, при расширении трубопровода часть кинетической энергии переходит в потенциальную, однако общее количество энергии (полный гидродинамический напор) остается постоянным. Это равенство сохраняется и при изменении геометрического напора в различных сечениях трубопровода.

При течении по трубопроводам реальных (вязких) жидкостей имеют место потери напора (давления), которые обуславливаются двумя факторами: сопротивлением трения и так называемыми местными сопротивлениями.

Сопротивление трения возникает в результате действия сил внешнего трения о стенки трубопровода. Потери напора на трение (h_{mp}) имеют место в равномерном потоке, распределены по всей длине трубопровода и зависят от режима течения потока и шероховатости внутренней стенки трубопровода.

Местные сопротивления возникают при любых изменениях скорости потока, обусловленных изменением его сечения, или при изменениях его направления (внезапное сужение, расширение, кран, диафрагма, поворот и т.п.). В этих местах трубопровода образуются мертвые зоны, в которых возникают замкнутые вихри, на образование которых затрачивается механическая энергия потока ($h_{м.с}$).

В реальных гидросистемах участки равномерного движения, как правило, чередуются с местными сопротивлениями. Если местные сопротивления разделены участками равномерного движения, т.е. не влияют друг на друга, то при подсчете полных потерь напора может быть применен принцип сложения (аддитивности).

Сумму потерь напора на трение и местные сопротивления называют потерянным напором ($h_{ном} = h_{тр} + h_{м.с}$). Название это условное, так как указанная часть энергии не «теряется», а переходит в тепловую и общий баланс энергии сохраняется. С учетом этого обстоятельства в уравнение Бернулли для реальной (вязкой) жидкости необходимо ввести член, учитывающий величину потерянного напора:

$$\text{либо } z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} - h_{ном} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g},$$

$$\text{либо } z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g} + h_{ном}.$$

Определение величины потерянного напора является центральной задачей прикладной гидравлики.

Потери напора на трение и местные сопротивления выражают в долях от скоростного напора:

$$h_{тр} = \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2g}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент трения;

l – длина трубопровода, м;

d – внутренний диаметр трубопровода, м (в случае трубы некруглого сечения берется $d_{экв}$);

$w^2/2g$ – скоростной напор, м ($w_{ср}$).

$$h_{м.с} = \xi_{м.с} \frac{w^2}{2g}, \quad (2)$$

где $\xi_{м.с}$ – коэффициент местного сопротивления (справочник);

$w^2/2g$ – скоростной напор, м (в данном случае при расчете скоростного напора w берется для узкого сечения потока).

При движении жидкостей по трубам и каналам различают два режима течения: ламинарный и турбулентный. Ламинарное течение характеризуется тем, что

частицы жидкости движутся по прямолинейным параллельным траекториям без перемешивания жидкости. В турбулентном потоке частицы движутся беспорядочно, хаотично. Наряду с поступательным движением происходят поперечные перемещения и вращательное движение частиц, которые приводят к интенсивному перемешиванию жидкости. Переход от ламинарного движения к турбулентному происходит внезапно при достижении некоторым безразмерным комплексом физических величин критического значения. Этот комплекс называется критерием Рейнольдса и имеет вид $Re = \frac{wd\rho}{\mu}$,

где w – средняя скорость потока, м/с;

d – внутренний диаметр трубопровода, м (в случае трубы некруглого сечения берется $d_{экв}$);

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

μ – динамическая вязкость жидкости, кг/м·с.

Для трубы круглого сечения критическое значение критерия $Re = 2320$. При числах Re ниже этой величины течение ламинарное, выше этого значения – турбулентное. Причем это критическое значение числа Re не зависит от рода жидкости (ρ , μ) и диаметра трубопровода.

Величина коэффициента трения (λ) в формуле (1) зависит от режима течения жидкости и состояния внутренней поверхности трубы:

$$\lambda = f\left(Re, \frac{d}{e}\right),$$

где d – внутренний диаметр трубопровода, м (в случае трубы некруглого сечения берется $d_{экв}$);

e – абсолютная эквивалентная шероховатость, м.

Эта зависимость приведена в приложении 1 (рис.1), средние значения абсолютной шероховатости – в приложении 2.

Значения коэффициентов местных сопротивлений зависит как от геометрии сопротивления, так и от режима течения:

$\xi_{м.с} = f(\text{геом}, Re)$ и приведены в справочной литературе [1].

В лабораторный практикум по гидродинамике входят четыре лабораторные работы:

- работа № 1: «Демонстрация режимов течения жидкости. Определение критерия Рейнольдса»;
- работа № 2: «Демонстрация уравнения Бернулли. Построение линии полного гидродинамического напора»;
- работа № 3: «Потери напора на местные сопротивления. Определение потерь напора при внезапном расширении трубы и коэффициента местного сопротивления»;
- работа № 4: «Потери напора на трение. Определение коэффициента трения и абсолютной эквивалентной шероховатости».

Лабораторная работа № 1. Демонстрация режимов течения жидкости. Определение критерия Рейнольдса

Режимы течения жидкости впервые были изучены английским физиком Рейнольдсом. Он экспериментально установил, что существует два режима течения жидкостей:

- ламинарный – когда частицы жидкости движутся по прямолинейным параллельным траекториям;
- турбулентный – когда частицы жидкости движутся не только в продольном, но также и в поперечном направлении, т.е. движутся по хаотическим, запутанным траекториям, сохраняя при этом общее направление движения.

Рейнольдс установил, что режим течения прямо зависит от скорости частиц жидкости (w , м/с), ее плотности (ρ , кг/м³) и диаметра трубопровода (d , м) и обратно зависит от вязкости жидкости (μ -динамический коэффициент вязкости, кг/м·с).

Предложенный им комплекс указанных величин был назван критерием Рейнольдса:

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu}.$$

Учитывая, что вязкость может быть охарактеризована кинематическим коэффициентом вязкости $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, м²/с, критерий Рейнольдса можно записать в

виде $Re = \frac{wd}{\nu}$.

Критерий Re – величина безразмерная.

Его физический смысл - это мера соотношения между силами инерции и силами трения в потоке жидкости или влияние трения на движение жидкости.

По численному значению критерия Re можно судить о режиме течения жидкости. При движении жидкости по круглым гладким трубам при $Re < 2320$ имеет место ламинарный режим, при $2320 < Re < 10000$ – переходный, при $Re > 10000$ наступает устойчивый (развитый) турбулентный режим.

Цель настоящей работы: повторить опыты Рейнольдса, убедиться в существовании в природе двух режимов течения жидкостей и определить численные значения критерия Re для ламинарного и турбулентного режимов.

Работа выполняется на установке, приведенной на рис.2.

Она состоит из напорного бака 1, подвод воды в который осуществляется по трубопроводу 2, а излишек воды сливается в канализацию по трубопроводу 3. Бак оборудован указателем уровня 4 и снабжен термометром 5. На нем также установлена емкость с краской 6. В днище бака закреплена стеклянная трубка 7 с внутренним диаметром $d = 21 \cdot 10^{-3}$ м. Под трубкой находится сборник 9 с площадью дна $F_{сб} = 8,7 \cdot 10^{-2}$ м², оснащенный мерной иглой 10 для измерения высоты жидкости в сборнике. Вентилем 11 регулируется подача воды в бак 1, вен-

тилем 12 регулируется расход воды в стеклянной трубке, вентилем 13 - расход краски, вентилем 14 осуществляется сброс воды из сборника в канализацию.

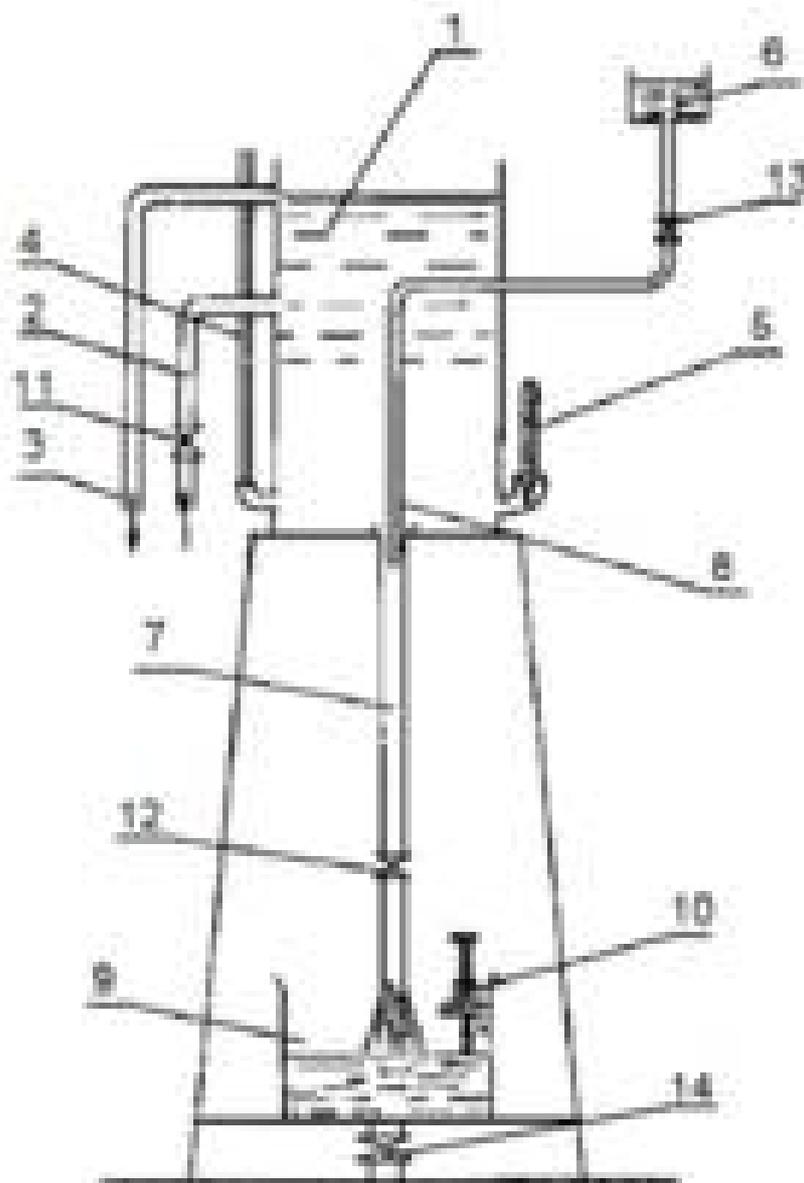


Рис. 2. Установка для демонстрации режимов движения жидкости:
1 – напорный бак; 2 – водоподводящий трубопровод; 3 – сливной трубопровод; 4 – указатель уровня воды в баке; 5 – термометр; 6 – емкость для краски; 7 – стеклянная трубка; 8 – капилляр для подвода краски; 9 – сборник; 10 – мерная игла; 11,12,13,14 – вентили

Порядок выполнения работы

1. Открывая вентиль 11, добиться постоянного уровня воды в напорном баке 1.
2. Регулируя вентили 12 и 13, добиться того, чтобы краска в стеклянной трубке 7 вытянулась в прямую линию по всей ее длине. Следить при этом, чтобы уровень жидкости в напорном баке оставался постоянным.
3. Закрыв вентиль 14, создать в сборнике 9 зеркало воды.

4. Мерной иглой 10 замерить начальный уровень жидкости в сборнике 9 и одновременно начать отсчет времени.
5. Через 3 – 5 минут закрыть вентили 12 и 13.
6. Мерной иглой замерить конечный уровень жидкости в сборнике 9.
7. Снять показания с термометра.
8. Открыть вентиль 14 и слить воду из сборника 9 в канализацию.

Обработка опытных данных и составление отчета

1. Выполнить схему установки и дать ее краткое описание.
2. По показаниям мерной иглы ($H_{м.и}$), площади зеркала воды в сборнике ($F_{сб}=8,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$) и времени эксперимента определить объемный расход воды в стеклянной трубке:

$$V = \frac{H_{м.и} \cdot F_{сб}}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. По уравнению расхода ($V = w \cdot F_{тр}$) определить среднюю скорость движения жидкости в стеклянной трубке, где $F_{тр}$ – площадь сечения стеклянной трубки, м.

4. Зная температуру воды, по таблице (приложение 3) определить значение динамического коэффициента вязкости (μ , кг/м·с).

5. Зная плотность воды ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$), определить значение критерия Рейнольдса для изучаемого режима: $Re = \frac{wd\rho}{\mu}$.

6. Сравнить полученные результаты с критическим значением критерия $Re=2320$. Сделать вывод о наблюдаемом режиме течения жидкости.

7. Повторить опыт для случая турбулентного режима течения жидкости. Для этого с помощью вентиля 12 и 13 добиться того, чтобы краска в стеклянной трубке распределилась по всему сечению трубки.

Повторить все замеры и расчеты для этого режима. Определить численное значение критерия Re , сравнить его с критическим.

Контрольные вопросы

1. Физический смысл числа Рейнольдса.
2. Критические значения чисел Рейнольдса.
3. Режимы течения жидкости.
4. Параметры, влияющие на режим движения жидкости.
5. Как определяется $d_{экв}$ для труб некруглого сечения?
6. Что такое ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости?
7. Как определяется средняя скорость потока и расход жидкости?
8. Что называется вязкостью жидкости?

Лабораторная работа № 2. Демонстрация уравнения Бернулли. Построение линии полного гидродинамического напора. Определение величины потеряннного напора

Как было указано во введении, полный гидродинамический напор потока вязкой жидкости складывается из:

- геометрического напора - расстояния центра тяжести потока от произвольно выбранной плоскости сравнения, z , м;
- пьезометрического напора- показания пьезометра (м), связанного с гидростатическим давлением $(p, \frac{H}{\rho g})$ равенством $h = \frac{p}{\rho g}$, м;
- скоростного напора, $\frac{w^2}{2g}$, м;
- потеряннного напора, $h_{ном}$, м.

Цель работы: при заданном расходе воды определить для разных точек трубопровода переменного сечения каждый из этих показателей, построить линии геометрического, пьезометрического и полного гидродинамического напоров и определить величины потеряннного напора.

Работа выполняется на установке, приведенной на рис. 3.

Установка состоит из трубопровода переменного сечения 1 с пробковым краном 3. На трубопроводе в четырех точках установлены пьезометры 2. Для измерения расхода воды используется треугольный водослив 4 с мерной линейкой 6.

Порядок выполнения работы

1. Осторожно открыть пробковый кран 3 на величину, указанную преподавателем.
2. Дать водному потоку в треугольном водосливе стабилизироваться.
3. С помощью мерной линейки замерить уровень воды над гребнем треугольного водослива (H) и занести это значение в отчетную таблицу (табл.1).
4. Очень тщательно снять показания пьезометров и занести данные в таблицу.
5. Закрывать пробковый кран 3. Закрывать его следует осторожно, чтобы не допустить гидравлического удара и, вследствие этого, выброса воды из пьезометров.
6. Приступить к расчетам.

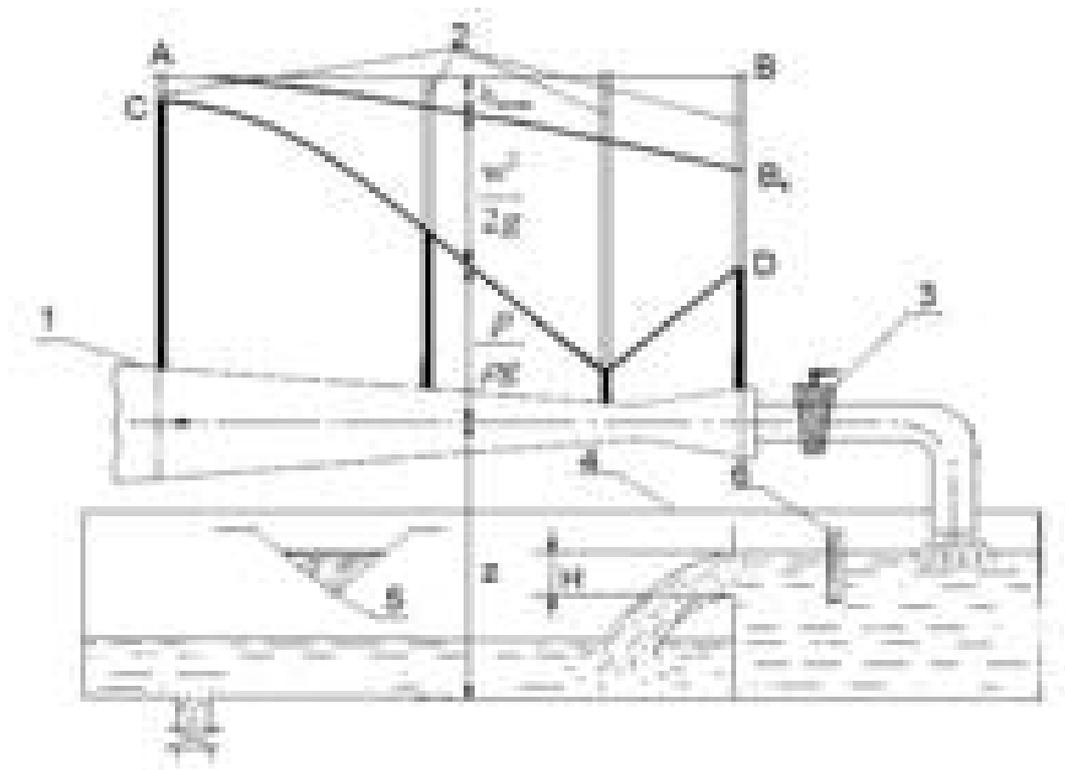


Рис. 3. Установка для демонстрации уравнения Бернулли:

1 – трубопровод переменного сечения; 2 – пьезометры; 3 – пробковый кран для регулирования расхода воды в трубопроводе; 4 – треугольный водослив; 5 – гребень слива; 6 – мерная линейка

Обработка опытных данных и составление отчета

1. Выполнить схему установки и дать ее краткое описание.
2. По уровню жидкости над гребнем слива (H , мм) и градуировочному графику (приложение 4) определить объемный расход воды, $V, \text{м}^3/\text{с}$.
3. Зная величину объемного расхода и диаметры сечений трубопровода, в которых установлены пьезометры, по уравнению расхода ($V = wF$) рассчитать средние скорости потока в этих сечениях.
4. Рассчитать величину скоростного напора, $\frac{w^2}{2g}, \text{м}$.
5. Зная величину геометрического напора (в данном случае трубопровод горизонтальный, поэтому во всех сечениях он равен $z=0,5\text{м}$), показания пьезометров и рассчитанные значения скоростного напора, найти величину полного гидродинамического напора для каждого сечения потока:

$$h_{\text{полн}} = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{w^2}{2g}$$

6. Для каждого сечения вычислить величину потеряннного напора, которая будет равна разности полного напора в первом сечении и в каждом последующем сечении: $h_{\text{пот}} = h_1 - h_i$.
7. Результаты вычислений занести в отчетную таблицу.

8. По данным таблицы построить линии:
- геометрического напора;
 - пьезометрического напора (CD);
 - полного гидродинамического напора для идеальной жидкости (AB);
 - полного гидродинамического напора для вязкой жидкости (AB₁).

Таблица 1

Результаты испытаний и расчетов

№ п/п	Наименование показателей и величин	Обозначение, размерность	Численные значения для разных сечений			
			1	2	3	4
1	Показание мерной линейки на треугольном водосливе	$H, \text{ мм}$				
2	Показания пьезометров (пьезометрический напор, удельная потенциальная энергия давления)	$\frac{p}{\rho g}, \text{ м}$				
3	Диаметр сечения	$d, \text{ м}$	$103 \cdot 10^{-3}$	$54 \cdot 10^{-3}$	$37 \cdot 10^{-3}$	$103 \cdot 10^{-3}$
4	Площадь сечения	$F = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ м}^2$				
5	Геометрический напор (удельная потенциальная энергия положения)	$z, \text{ м}$	0,500	0,500	0,500	0,500
6	Расход воды	$V, \text{ м}^3/\text{с}$				
7	Средняя скорость	$w, \text{ м/с}$				
8	Скоростной напор (удельная кинетическая энергия)	$\frac{w^2}{2g}, \text{ м}$				
9	Полный гидродинамический напор (полная удельная энергия потока)	$h_{\text{полн}} = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{w^2}{2g}, \text{ м}$				
10	Потерянный напор	$h_{\text{пот}} = h_1 - h_i, \text{ м}$				

Контрольные вопросы

1. Что такое объемный расход, его размерность? Каким прибором измеряется объемный расход воды в данной работе?
2. Принцип работы треугольного водослива.
3. Как находится средняя скорость потока в каждом сечении трубопровода?
4. Из каких членов состоит уравнение Бернулли для потока жидкостей: идеальной и реальной (вязкой) жидкости? Их энергетический и геометрический смысл.
5. Какими приборами можно измерить величину пьезометрического напора? Как определяется пьезометрический напор в данной работе?
6. Какими приборами можно измерить величину скоростного напора? Как определяется скоростной напор в данной работе?
7. Почему в первом и четвертом сечениях трубопровода величина скоростного напора одинакова?
8. Как и почему изменяются составляющие уравнения Бернулли при переходе от первого сечения потока к четвертому?
9. Могут ли пьезометрический и скоростной напоры в каждом последующем сечении быть больше, чем в предыдущем? Может ли величина полного гидродинамического напора в каждом последующем сечении быть больше, чем в предыдущем?
10. На что расходуется механическая энергия потока при движении жидкости по трубопроводу?
11. Частным случаем какого закона является уравнение Бернулли?

Лабораторная работа № 3. Потери напора на местные сопротивления. Определение потерь напора при внезапном расширении трубы и расчет коэффициента местного сопротивления

Как было указано во введении, одной из составляющих потерянного напора является потеря напора на преодоление местных сопротивлений. Одним из видов местных сопротивлений является внезапное расширение трубы. Общая формула, по которой можно вычислить потерю напора на местное сопротивление имеет вид

$$h_{м.с} = \xi_{м.с} \frac{w^2}{2g}, \quad (1)$$

где $\xi_{м.с}$ - коэффициент местного сопротивления;

$\frac{w^2}{2g}$ – скоростной напор, м ($w_{ср}$).

Цель работы:

- определить потерю напора при внезапном расширении трубы;
- рассчитать коэффициент местного сопротивления и сравнить полученное в эксперименте значение со справочным.

Работа выполняется на установке, приведенной на рис. 4.

Она состоит из короткого участка трубопровода с различными диаметрами. На нем установлены два пьезометра: один в узком, другой в широком сечении. Для измерения расхода воды используется треугольный водослив.

Порядок выполнения работы

1. Осторожно открыть пробковый кран 3 на величину, указанную преподавателем.
2. Дать водному потоку в треугольном водосливе стабилизироваться.
3. С помощью мерной линейки замерить уровень воды над гребнем треугольного водослива (H , мм) и занести это значение в таблицу (табл. 2).
4. Очень тщательно снять показания пьезометров и занести данные в таблицу.
5. Закрыть пробковый кран 3. Закрывать его следует осторожно, чтобы не допустить гидравлического удара и, как следствие, выброса воды из пьезометров.
6. Приступить к расчетам.

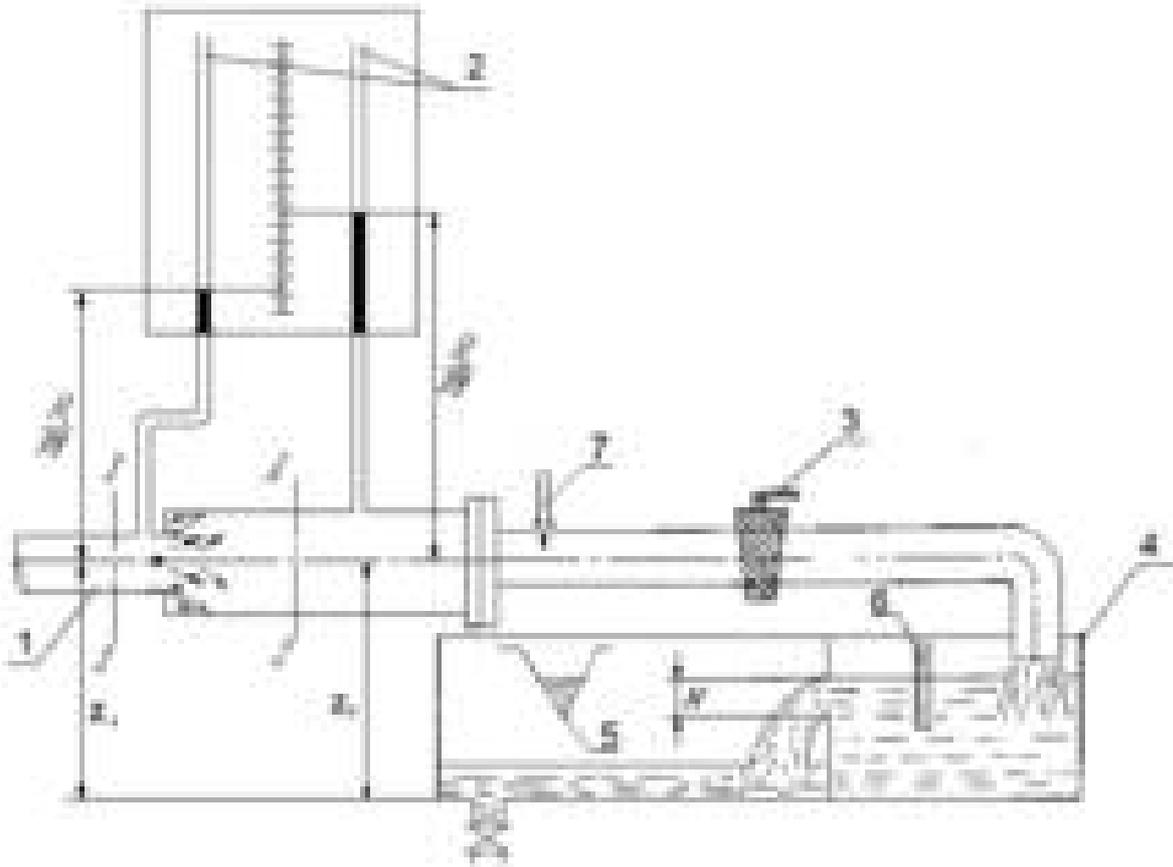


Рис. 4. Установка для определения потери напора при внезапном расширении трубы:
 1 – трубопровод; 2 – пьезометры; 3 – пробковый кран; 4 – треугольный водослив; 5 – гребень слива; 6 – мерная линейка; 7 – термометр

Обработка опытных данных и составление отчета

1. Выполнить схему установки и дать ее краткое описание.
2. Зная уровень жидкости над гребнем слива (H , мм), по градуировочному графику (приложение 4) определить объемный расход воды, V , м³/с.
3. Зная величину объемного расхода (V) и диаметры сечений трубопровода, в которых установлены пьезометры, по уравнению расхода ($V = w F$) найти значения средних скоростей потока в этих сечениях.

4. Рассчитать величину скоростного напора, $\frac{w^2}{2g}$, м.

5. Зная величину геометрического напора (поскольку трубопровод горизонтальный, то в обоих сечениях он будет равным $z_1 = z_2 = 0,5$ м), показания пьезометров ($\frac{p}{\rho g}$, м) и рассчитанные значения скоростных напоров ($\frac{w^2}{2g}$), найти величину полного гидродинамического напора для каждого сечения потока:

$$h_{\text{полн}} = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{w^2}{2g}.$$

6. Результаты занести в таблицу.

7. Определить величину потеряннного напора ($h_{м.с}$), которая будет равна разности полных гидродинамических напоров в первом и втором сечениях.

8. Зная величину $h_{м.с}$, из формулы (1) найти значение $\xi_{м.с}$. Значение средней скорости взять для узкого сечения.

9. Найти для узкого сечения численное значение критерия $Re = w d \rho / \mu$.

10. Определить соотношение площадей сечений (F_1/F_2).

11. По численному значению Re и соотношению F_1/F_2 по таблице (приложение 5) найти справочное значение $\xi_{м.с}$ для данного случая внезапного расширения трубы.

12. Сравнить полученное опытным путем значение $\xi_{м.с}$ (п. 8) со справочным (п. 11).

13. Сделать заключение.

Таблица 2

Результаты испытаний и расчетов

№ п/п	Наименование показателей и величин	Обозначение, размерность	Численные значения для разных сечений	
			1	2
1	Показание мерной линейки на треугольном водосливе	$H, мм$		
2	Показания пьезометров (пьезометрический напор, удельная потенциальная энергия давления)	$\frac{p}{\rho g}, м$		
3	Диаметр сечения	$d, м$	$40 \cdot 10^{-3}$	$103 \cdot 10^{-3}$
4	Площадь сечения	$F = \frac{\pi d^2}{4}, м^2$		
5	Геометрический напор (удельная потенциальная энергия положения)	$z, м$	0,500	0,500
6	Расход воды	$V, м^3/с$		
7	Средняя скорость	$w, м/с$		
8	Скоростной напор (удельная кинетическая энергия)	$\frac{w^2}{2g}, м$		
9	Полный гидродинамический напор (полная удельная энергия потока)	$h_{полн} = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{w^2}{2g}, м$		

Контрольные вопросы

1. Что означает понятие «местное сопротивление»?
2. Какими факторами обуславливаются потери напора в местных сопротивлениях?
3. Что такое объемный расход, его размерность? Каким прибором измеряется объемный расход воды в данной работе? Принцип его работы.
4. Как находится средняя скорость потока в каждом сечении трубопровода? Как она изменяется с изменением сечения трубопровода?
5. Что такое полный гидродинамический напор? Из каких составляющих он состоит?
6. Как определяется пьезометрический напор в данной работе?
7. Как определяется скоростной напор в данной работе?
8. Как изменяются удельная потенциальная и удельная кинетическая энергия потока при переходе от узкого сечения к широкому?
9. Какую скорость находят из уравнения расхода: локальную, среднюю или критическую?
10. В какую форму переходит механическая энергия потока при прохождении местных сопротивлений?

Лабораторная работа № 4. Потери напора на трение. Определение коэффициента трения и абсолютной эквивалентной шероховатости

Как было указано во введении, одной из составляющих потеряннного напора является потеря напора на трение. Общая формула, по которой можно вычислить потерю напора на трение, имеет вид

$$h_{тр} = \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2g}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент трения;

l – длина трубопровода, м;

d – внутренний диаметр трубопровода, м (в случае трубы некруглого сечения берется $d_{экв}$);

$w^2/2g$ – скоростной напор, м (w_{cp}).

Цель работы:

- опытным путем определить значение коэффициента трения для заданного режима течения жидкости;

- найти абсолютную эквивалентную шероховатость трубопровода.

Работа выполняется на установке, приведенной на рис. 5.

Она состоит из стального горизонтального трубопровода 1 с диаметром 43x2,5 мм и длиной 5,5 м, на котором установлены пьезометры 2, термометр 3, водяной расходомер 4 и пробковый кран 5.

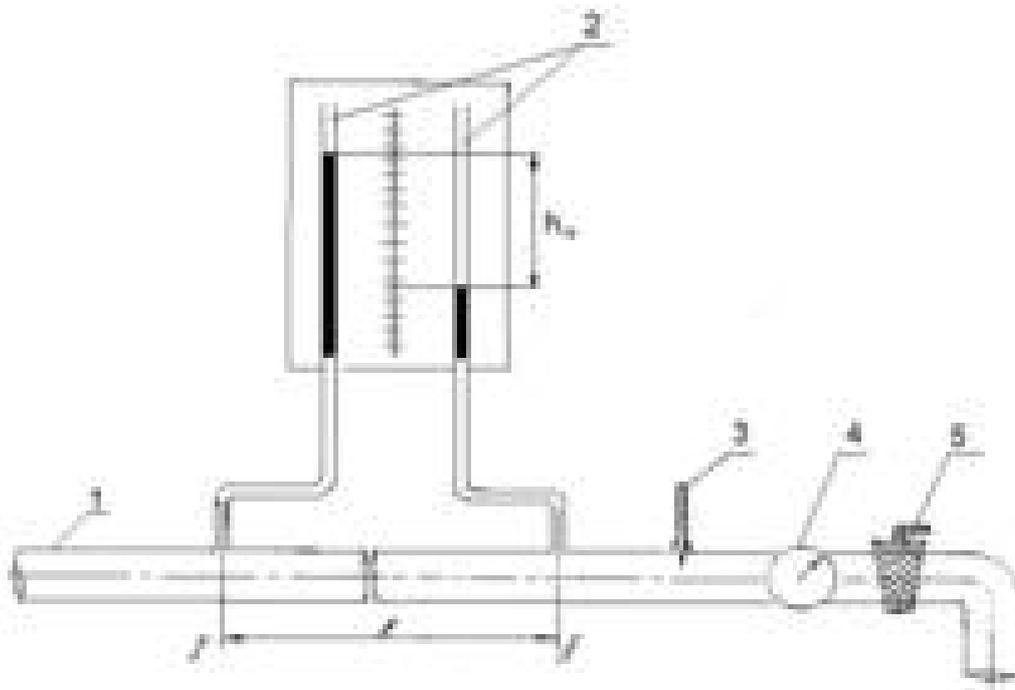


Рис. 5. Установка для определения коэффициента трения и абсолютной эквивалентной шероховатости:

1 – трубопровод; 2 – пьезометры; 3 – термометр; 4 – водяной расходомер; 5 – пробковый кран

Порядок выполнения работы

1. Осторожно открыть пробковый кран 5 на величину, указанную преподавателем.
2. С помощью секундомера замерить время (τ , с), за которое стрелка расходомера совершает один полный оборот. Полученное значение занести в табл.3.
3. Тщательно снять показания пьезометров, показания термометра и занести их в табл.3.
4. Закрывать пробковый кран 5. Закрывать его надо осторожно, чтобы не допустить гидравлического удара и, как следствие, выброса воды из пьезометров.
5. Приступить к расчетам.

Обработка опытных данных и составление отчета

1. Выполнить схему установки и дать ее краткое описание.
2. Зная, что один полный оборот водяного расходомера соответствует расходу, равному $0,1 \text{ м}^3$, определить объемный расход воды ($V=0.1/\tau$, $\text{м}^3/\text{с}$).
3. Зная величину объемного расхода (V , $\text{м}^3/\text{с}$) и диаметр трубопровода (d , м), определить по уравнению расхода ($V = wF$) среднюю скорость потока (w , $\text{м}/\text{с}$) и скоростной напор ($\frac{w^2}{2g}$, м).

4. Записать уравнение Бернулли для двух сечений $z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} =$
 $= z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g} + h_{mp}.$

Так как трубопровод горизонтальный, то $z_1 = z_2$, поскольку трубопровод постоянного сечения (т.е. $d_1 = d_2$), то $w_1 = w_2$, тогда

$$h_{mp} = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g}.$$

5. С другой стороны: $h_{mp} = \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2g}.$

6. Зная экспериментально найденное значение h_{mp} , длину трубопровода, его диаметр d и значение скоростного напора ($\frac{w^2}{2g}$), найти

коэффициент трения $\lambda = \frac{h_{mp} d 2g}{lw^2}.$

7. Найти численное значение критерия $Re = \frac{wd\rho}{\mu}$, при этом ρ принять за 1000 кг/м³, а значение μ найти в зависимости от температуры по таблице (приложение 3).

8. По рассчитанным значениям коэффициента трения (λ) и критерия Re , по графику зависимости $\lambda = f\left(Re, \frac{d}{e}\right)$ - (приложение 1) найти значение $\frac{d}{e}$ и из него определить величину абсолютной эквивалентной шероховатости.

9. Эту же величину определить по эмпирической расчетной формуле

$$\frac{1}{\lambda^{0.5}} = -2\lg\left[\frac{e}{(3,7d)} + \left(\frac{6,81}{Re}\right)^{0.9}\right]$$

10. Сравнить полученное значение со справочными данными (приложение 5). Сделать заключение.

Таблица 3

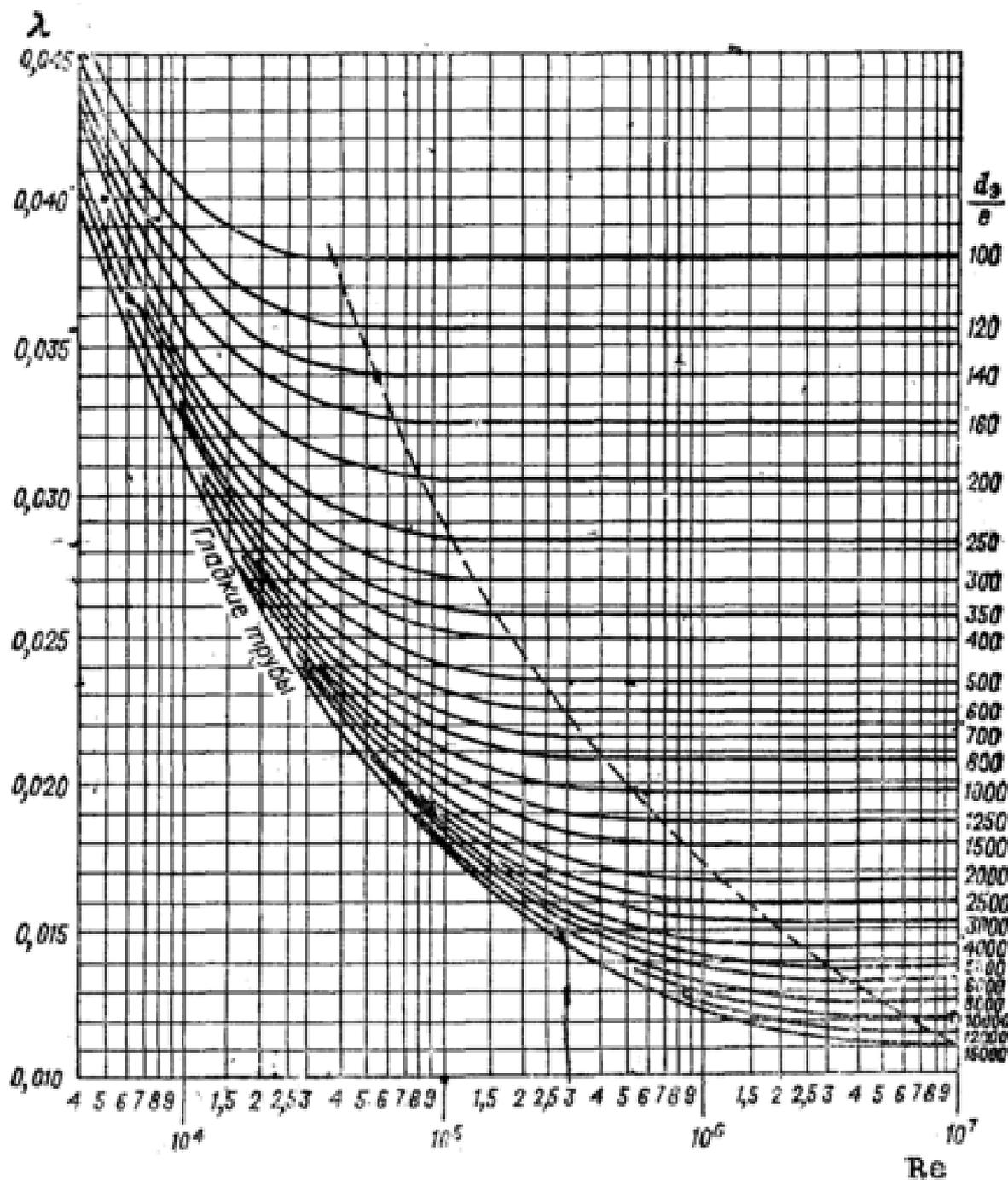
Результаты измерений и расчетов

№ п/п	Наименование показателей и величин	Обозначение, размерность	Численные значения для разных сечений	
			1	2
1	Время, за которое стрелка расходомера совершает один полный оборот	τ, c		
2	Показания пьезометров (пьезометрический напор, удельная потенциальная энергия давления)	$\frac{p}{\rho g}, m$		
3	Диаметр трубопровода	d, m	$36 \cdot 10^{-3}$	$36 \cdot 10^{-3}$
4	Длина трубопровода	l, m	5	5
5	Площадь сечения	$F = \frac{\pi d^2}{4}, m^2$		
6	Геометрический напор (удельная потенциальная энергия положения)	z, m	0,500	0,500
7	Расход воды	$V, m^3/c$		
8	Средняя скорость	$w, m/c$		
9	Скоростной напор (удельная кинетическая энергия)	$\frac{w^2}{2g}, m$		
10	Полный гидродинамический напор (полная удельная энергия потока)	$h_{полн} = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{w^2}{2g}, m$		

Контрольные вопросы

1. Каким образом в работе определяется расход воды? Какую размерность он имеет?
2. Что такое средняя скорость потока? Как она определяется?
3. Из чего складывается гидравлическое состояние трубопроводов?
4. Какова структура потока при турбулентном течении жидкости?
5. Что такое ламинарный пограничный слой? От каких факторов зависит его толщина?
6. Понятие об абсолютной эквивалентной шероховатости.
7. Что такое относительная эквивалентная шероховатость, какую размерность она имеет?
8. Что такое автомодельный режим течения?
9. Какие зоны трения различают при турбулентном режиме течения жидкости?
10. Что такое коэффициент трения?
11. Что такое коэффициент сопротивления трению?
12. Какие факторы влияют на коэффициент трения при ламинарном и турбулентном течении жидкости?
13. В каких случаях шероховатость внутренней стенки трубопровода оказывает влияние на гидравлическое сопротивление трубопровода?
14. Всегда ли критерий Рейнольдса оказывает влияние на гидравлическое сопротивление трубопровода?

Приложение 1



d_3 – эквивалентный диаметр, м;
 e – средняя высота выступов шероховатости на внутренней поверхности трубы, м

Рис.1. Зависимость коэффициента трения λ от критерия Re и степени шероховатости d_3/e

Приложение 2

Таблица
Среднее значение шероховатости стенок труб

Трубопроводы	<i>e</i> , мм
Трубы стальные цельнотянутые и сварные при незначительной коррозии	0,2
Старые заржавленные стальные трубы	0,67 и выше
Трубы из кровельной стали проолифенные	0,125
Чугунные трубы водопроводные, бывшие в эксплуатации	1,4
Алюминиевые технически гладкие трубы	0,015-0,06
Чистые цельнотянутые трубы из латуни, меди и свинца; стеклянные трубы	0,0015-0,01
Бетонные трубы; хорошая поверхность с затиркой	0,3-0,8
Бетонные трубы; грубая (шероховатая) поверхность	3-9
Нефтепроводы при средних условиях эксплуатации и паропроводы насыщенного пара	0,2
Паропроводы, работающие периодически	0,5
Воздухопроводы сжатого воздуха от компрессора	0,8
Конденсатопроводы, работающие периодически	1,0

Приложение 3

Таблица
Динамические коэффициенты вязкости воды при различной температуре

Температура, °С	Динамический коэффициент вязкости, мПа·с	Температура, °С	Динамический коэффициент вязкости, мПа·с
1	1,792	26	0,8737
2	1,731	27	0,8545
3	1,673	28	0,8360
4	1,619	29	0,8180
5	1,567	30	0,8007
6	1,473	31	0,7840
7	1,428	32	0,7679
8	1,386	33	0,7523
9	1,346	34	0,7371
10	1,308	35	0,7225
11	1,271	36	0,7085
12	1,236	37	0,6947
13	1,203	38	0,6814
14	1,171	39	0,6685
15	1,140	40	0,6560
16	1,111	41	0,6439
17	1,083	42	0,6321
18	1,056	43	0,6207
19	1,030	44	0,6097
20	1,005	45	0,5988
20,2	1,000	49	0,5883
21	0,9810	47	0,5782
22	0,9579	48	0,5683
23	0,9358	49	0,5588
24	0,9142	50	0,5494
25	0,8937		

Приложение 4

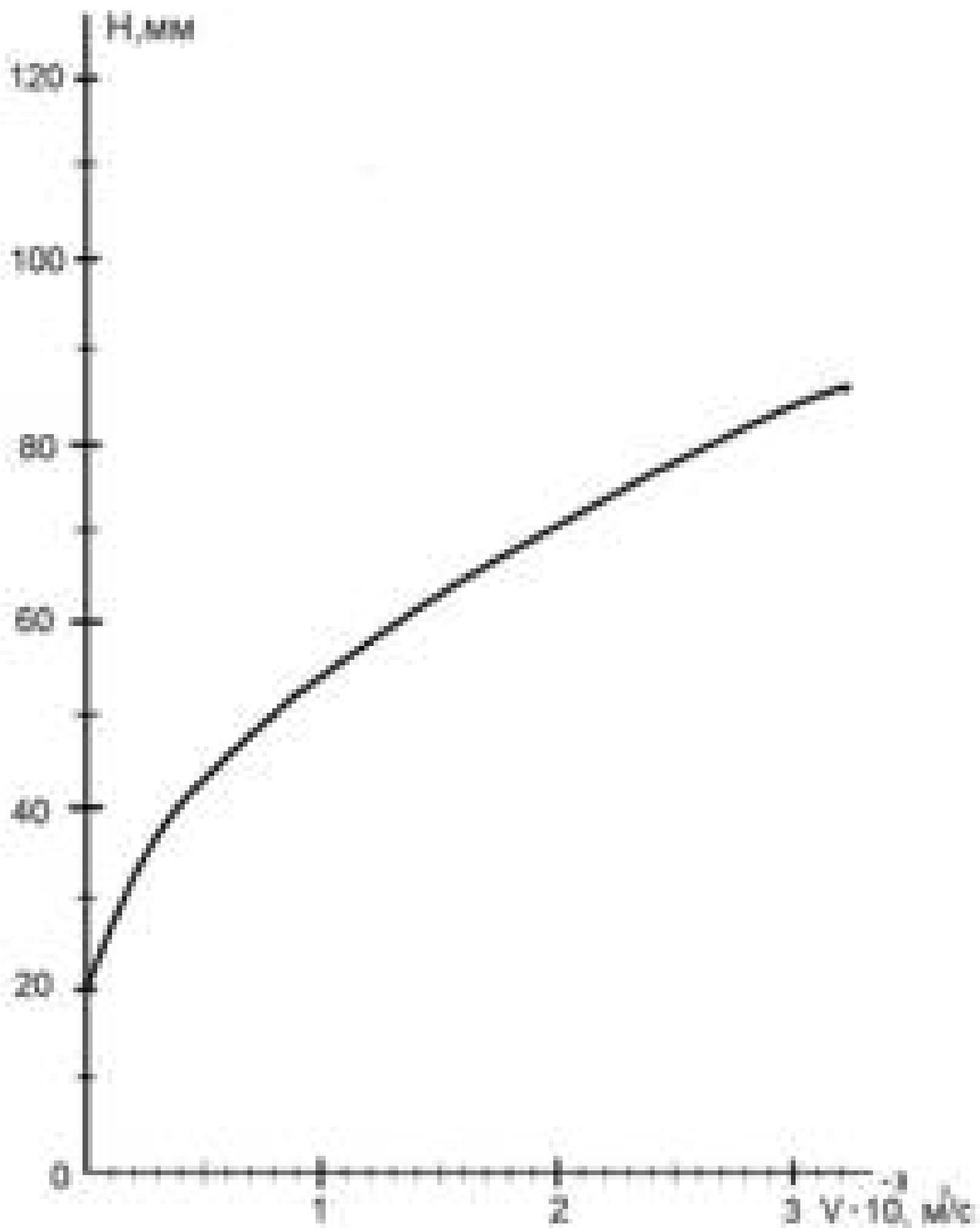
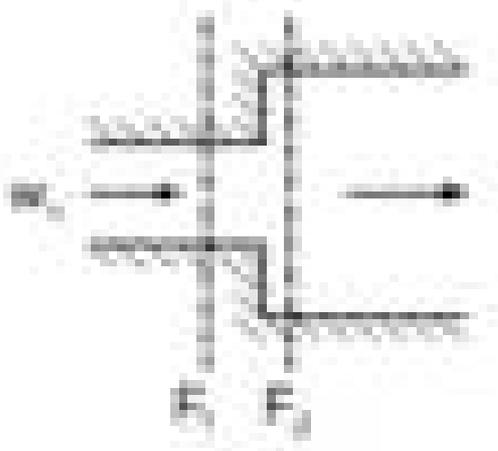


Рис.1. Калибровочный график для определения расхода воды через треугольный водослив.

Приложение 5

Коэффициенты местных сопротивлений

Внезапное расширение



F_1 — площадь меньшего поперечного сечения, m^2 ; w_1 — скорость потока в меньшем сечении, m/c ; F_2 — площадь большего поперечного сечения, m^2

$Re = \frac{w_1 d \rho}{\mu} = \frac{w_1 d}{\nu}$	F_1/F_2					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
10	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
100	1,70	1,40	1,20	1,10	0,90	0,80
1000	2,0	1,60	1,30	1,05	0,90	0,60
3000	1,00	0,70	0,60	0,40	0,30	0,20
3500 и более	0,81	0,64	0,50	0,36	0,25	0,16

Библиографический список

1. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф.Павлов, П.Г.Романков, А.А.Носков. - Л.: Химия, 1987.
2. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии / Ю.И.Дытнерский. - М.: Химия, 2002. – Т.1,2.
3. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г.Касаткин. - М.: Химия, 1973.
4. Процессы и аппараты химической технологии / А.Н.Плановский, П.И.Николаев. - М.: Химия, 1987.