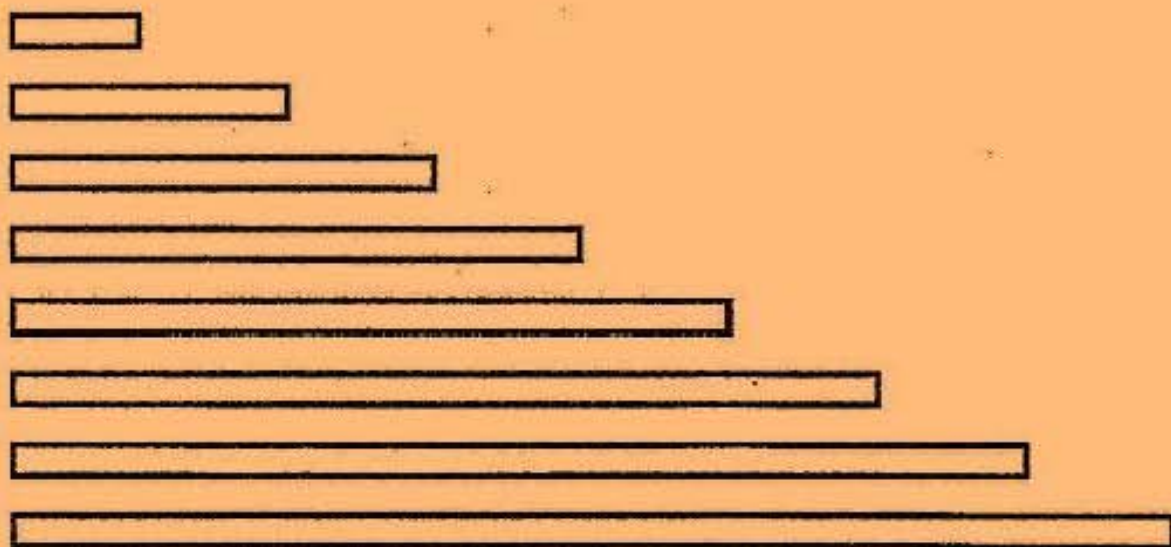
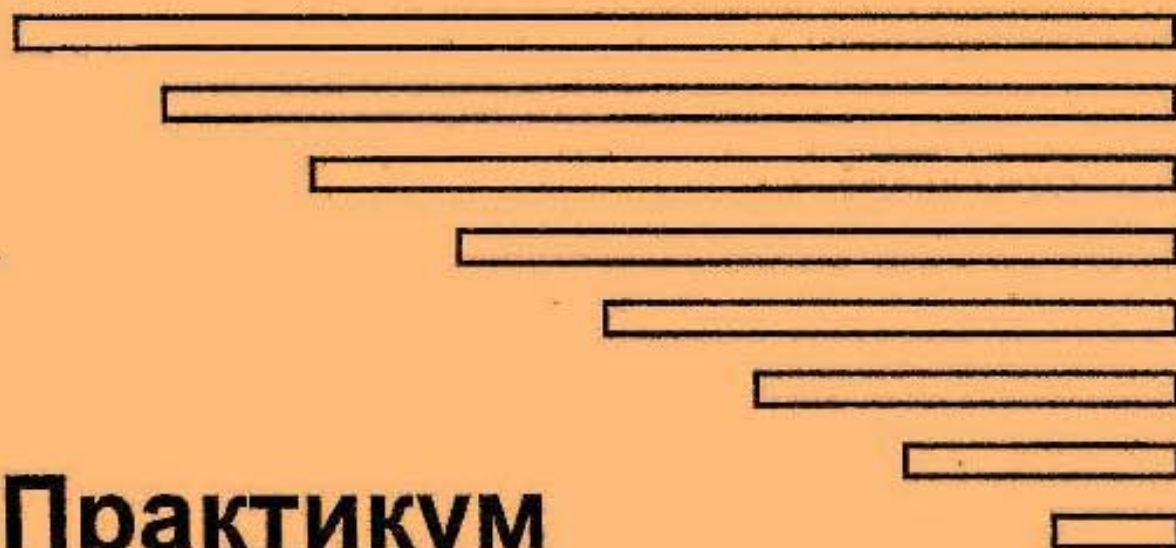




ГИДРАВЛИКА

Часть 3

ГИДРОДИНАМИКА



Практикум

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЛЕСА»

ГИДРАВЛИКА

Часть третья

ГИДРОДИНАМИКА

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом университета
в качестве практикума для студентов направлений подготовки и специальностей

220301 Автоматизация технологических процессов и производств,

240406 Технологии химической переработки древесины,

150405 Машины и оборудование лесного комплекса,

150400 Технологические машины и оборудование,

250400 Технология и оборудование лесозаготовительных
и деревообрабатывающих производств,

250403 Технология деревообработки

2-е издание



Москва

Издательство Московского государственного университета леса
2010

УДК 621.22 (075.8)

Г46

Разработано в соответствии с Государственным образовательным стандартом ВПО 2000 г. на основе примерной программы дисциплины «Гидравлика (Механика жидкости и газа)»

Авторы: Г. Н. Афанасьев, А. С. Савицкий, А. А. Шевляков,
М. В. Лопатников, В. Н. Емельянова

Рецензент: кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехника»
А. В. Хроменко

Работа подготовлена на кафедре процессов и
аппаратов деревообрабатывающих производств

Г46 Гидравлика. Ч. 3. Гидродинамика : практикум. – 2-е изд. – М. :
ГОУ ВПО МГУЛ, 2010. – 24 с.

В практикуме рассмотрены теоретические вопросы ряда тем гидродинамики, обязательных при изучении дисциплин «Гидравлика» и «Процессы и аппараты химической технологии». Основное внимание уделено описанию методик лабораторных работ по этим темам. В каждом разделе приведены вопросы для самостоятельной работы, ответы на которые могут быть полезны при подготовке, проведения и защите лабораторных работ.

УДК 621.22 (075.8)

Учебное издание

ГИДРАВЛИКА

Часть третья

ГИДРОДИНАМИКА

Под редакцией авторов

Оригинал-макет подготовил А. А. Шевляков

По тематическому плану внутривузовских изданий учебной литературы на 2010 г.

Подписано в печать 22.01.2010. Формат 60×90 1/16. Бумага 80 г/м²

Гарнитура «Таймс». Ризография. Усл. печ. л. 1,5.

Тираж 150 экз. Заказ № 10.

Издательство Московского государственного университета леса.
141005, Мытищи-5, Московская обл., 1-я Институтская, 1, МГУЛ.

E-mail: izdat@mgul.ac.ru

По вопросам приобретения литературы издательства ГОУ ВПО МГУЛ
обращаться в отдел реализации.

Телефон: (498) 687-41-33, E-mail: kurilkina@mgul.ac.ru

© Г. Н. Афанасьев, А. С. Савицкий,
А. А. Шевляков, М. В. Лопатников,
В. Н. Емельянова, 2008

© ГОУ ВПО МГУЛ, 2010

Введение

Часть III лабораторного практикума по гидравлике является логическим продолжением части II и включает в себя описание четырех заключительных работ по разделу гидродинамики. Таким образом, II и III части практикума позволяют студенту выполнить шесть лабораторных работ, охватывающих все основные темы гидродинамики.

Лабораторные работы выполняются на универсальных лабораторных стендах кафедры процессов и аппаратов деревообрабатывающих производств. На каждом из шести лабораторных стендов могут выполняться последовательно шесть лабораторных работ.

В III части практикума включены описания следующих лабораторных работ:

- определение постоянной расходомера Вентури;
- определение коэффициента гидравлического сопротивления при движении жидкости в трубопроводе;
- определение коэффициентов местных сопротивлений;
- исследование истечения жидкости через отверстия и насадки.

Общие требования к порядку выполнения лабораторных работ и правила техники безопасности приведены в части I настоящего лабораторного практикума.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РАСХОДОМЕРА ВЕНТУРИ

1. Измерение расхода жидкости расходомером Вентури

Для измерения расхода жидкости часто применяется расходомер Вентури, принцип действия которого основан на использовании уравнения Бернулли.

Расходомер Вентури состоит из двух конических насадков с цилиндрической вставкой между ними (рис. 1). Переходы между коническими частями и цилиндрической имеют плавную криволинейную форму, позволяющую до минимума снизить потери напора в расходомере. Перед входным коническим насадком и в цилиндрической части расходомера установлены два пьезометра.

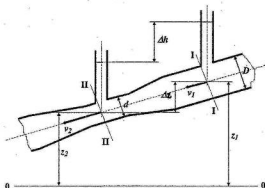


Рис. 1. Схема расходомера Вентури

Запишем уравнение Бернулли для сечений I и II:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + h_{l-2}.$$

Из уравнения постоянства расхода для этих же сечений следует:

$$Q_v = v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 \quad \text{или} \quad Q_v = v_1 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = v_2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

$$\text{Откуда имеем } v_2 = v_1 \cdot \frac{D^2}{d^2}.$$

Используя выражение для v_2 и, пренебрегая (авиду их малости) потерями напора h_{1-2} , преобразуем уравнение Бернулли к виду:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2 \cdot \frac{D^4}{d^4}}{2 \cdot g}.$$

Обозначив разность уровней жидкости в пьезометрах как $\Delta h = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} \right)$, получим зависимость для определения средней скорости в трубопроводе

$$v_1 = \sqrt{\frac{1}{\alpha_2 \cdot D^4 / d^4 - \alpha_1}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}.$$

Определим расход жидкости

$$Q_v = v_1 \cdot S_1 = S_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{\alpha_2 \cdot D^4 / d^4 - \alpha_1}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}.$$

Обозначим $S_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{\alpha_2 \cdot D^4 / d^4 - \alpha_1}} = \mu$ и дополнительно введем

коэффициент k для учета потери напора при течении жидкости через расходомер ($k < 1$).

$$\text{Тогда } Q_v = \mu \cdot k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} = C \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h},$$

где $C = \mu \cdot k$ – постоянная расходомера Вентури.

Как видно из приведенного вывода, постоянная C зависит от режима течения жидкости, а также от формы и размеров трубки Вентури. Для каждого конкретного расходомера она является величиной сугубо индивидуальной и определяется экспериментально для заданного диапазона расхода жидкости.

2. Цель работы

1. Определение постоянной расходомера Вентури.
2. Использование расходомера Вентури для измерения расхода воды при проведении лабораторных работ на гидравлическом стенде.

3. Описание рабочего участка

Расходомер Вентури вмонтирован в центральную часть рабочего участка, используемого в лабораторной работе № 3 (см. ч. II практикума) для исследования уравнения Бернулли. Диаметр узкой части расходомера составляет 0,01 м, а широкой – 0,02 м.

Для измерения потерь напора в расходомере служат пьезометры, установленные во II и III сечениях трубки Бернулли. Вентиль 3 (см. ч. II

практикума, рис. 1) служит для открытия движения жидкости через расходомер и для регулирования ее расхода в процессе эксперимента.

4. Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство рабочего участка и опробовать его в работе.
2. Открыть вентиль 3 и установить минимальный расход воды в рабочем участке (скоростной напор в узком сечении расходомера Вентури не должен превышать 5 – 7 мм).
3. Снять показания пьезометров h_1 и h_2 , расположенных соответственно в начале и в конце расходомера Вентури (сечения II и III трубки Бернулли соответственно), и занести их в таблицу результатов эксперимента.
4. Измерить объемным способом расход жидкости, как это указано в части II практикума, и занести данные в таблицу результатов эксперимента.
5. С помощью регулировочного вентиля 3 увеличить расход воды и провести еще 5 – 7 измерений по п.п. 2 – 4 при различных расходах, включая максимально возможный.
6. Провести проверочный опыт, для чего:
 - 6.1. Открыть вентиль 3 и установить произвольное значение расхода воды в рабочем участке.
 - 6.2. Провести измерения по п.п. 2 – 4 и занести результаты в таблицу проверочного эксперимента.

5. Обработка результатов

1. По значениям напора в начале и конце расходомера Вентури (II и III сечения трубки Бернулли), вычислить потери напора $\Delta h = (h_1 - h_2)$ на расходомере Вентури для всех проведенных опытов.
2. Пользуясь полученными значениями расхода Q , вычислить значения средней скорости и чисел Рейнольдса в широком и узком сечениях расходомера для всех опытов.
3. Рассчитать значения постоянной расходомера Вентури для всех проведенных опытов C_1 .
4. Рассчитать среднее для всех опытов значение постоянной расходомера Вентури C_{cp} .
5. По разности показаний пьезометров расходомера в проверочном опыте $\Delta h = (h_1 - h_2)$ рассчитать, пользуясь полученным средним значением постоянной расходомера Вентури C_{cp} , величину расхода жидкости в трубопроводе $Q_{расч}$.

6. По экспериментальному значению $Q_{в\text{эксп}}$ рассчитать значения средней скорости и чисел Рейнольдса в широком и узком сечениях расходомера.

7. Сравнить полученное в проверочном эксперименте значение расхода $Q_{в\text{эксп}}$ с его расчетным значением $Q_{в\text{расч}}$, сделать вывод об их соответствии и вычислить значение относительной погрешности по формуле

$$\epsilon = 100 \cdot |(Q_{в\text{расч}} - Q_{в\text{эксп}}) / Q_{в\text{эксп}}|$$

Контрольные вопросы

1. Как устроен расходомер Вентури?
2. Какова цель выполнения лабораторной работы?
3. Каков порядок выполнения лабораторной работы?
4. По какой формуле производится пересчет показаний расходомера Вентури в значение расхода?
5. От чего зависит численное значение постоянной расходомера Вентури?
6. Если расходомер Вентури использовать для определения расхода двух различных жидкостей, то будут ли при одинаковых показаниях расходомера Δh одинаковы и значения расходов в обоих случаях?
7. Зависит ли значение постоянной расходомера Вентури от режима течения жидкости?
8. Учитывает ли постоянная расходомера Вентури потери напора в расходомере?
9. Зависит ли значение постоянной расходомера Вентури от угла наклона оси прибора к горизонту?
10. Влияет ли угол наклона оси расходомера Вентури к горизонту на величину полученного по нему значения расхода жидкости?
11. В чем достоинства и недостатки измерения расхода расходомером Вентури по сравнению с измерением его объемным методом (как это делается в лабораторных работах 2 и 3)?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ

1. Потери напора по длине трубопровода

При движении потока реальной жидкости по трубопроводу часть его энергии затрачивается на преодоление сил трения. Эти потери принято называть потерями напора на трение, или потерями по длине трубопровода. Потери по длине являются составной частью полных потерь напора в трубопроводе и знание их необходимо для выбора насоса.

Для практических расчетов потерь напора h_l по длине в трубопроводе применяют формулу Дарси-Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

где λ — коэффициент гидравлического сопротивления, 1;

l — длина трубопровода, м;

d — диаметр трубопровода (в случае не круглого сечения используется эквивалентный гидравлический диаметр), м;

v — средняя скорость жидкости в трубопроводе, м/с.

Как следует из формулы Дарси-Вейсбаха, потери напора на трение прямо пропорциональны длине l и скоростному напору $v^2/2 \cdot g$ и обратно пропорциональны диаметру d трубопровода.

Расчет по формуле можно проводить только для участков трубопровода, на которых диаметр и скорость по всей длине участка не меняются. Для трубопроводов переменного сечения полные потери на трение определяются как сумма потерь на составляющих его участках с постоянными диаметром и скоростью течения.

Основная сложность при расчете потерь на трение состоит в определении коэффициента гидравлического сопротивления λ . Доказано, что λ зависит в общем случае от числа Рейнольдса и от механической шероховатости на внутренней стенке трубы Δ , т.е. $\lambda = f(Re, \Delta/d)$, где отношение Δ/d называется относительной шероховатостью трубопровода.

В зависимости от числа Рейнольдса весь диапазон значений коэффициента гидравлического сопротивления можно условно разбить на 4 зоны.

Зона I характеризуется ламинарным режимом течения и соответствует области чисел Рейнольдса $Re \leq 2300$. Поэтому эту зону называют зоной ламинарного движения. В этой зоне коэффициент гидравлического сопротивления зависит только от числа Рейнольдса $\lambda = f(Re)$ и расчет производят по формуле

$$\lambda = A/Re,$$

где A – постоянная величина, зависящая от формы поперечного сечения трубопровода: для круглых труб $A = 64$; для квадратных $A = 59$; для кольцевого сечения $A = 96$.

Зоны II, III, IV – характеризуются турбулентным режимом течения жидкости.

Зона II соответствует значениям чисел Рейнольдса в диапазоне $2300 \leq Re \leq 30 \cdot d/\Delta$. В этой зоне шероховатость стенок трубопровода также не влияет на величину коэффициента гидравлического сопротивления ($\lambda = f(Re)$). Зону принято называть зоной гидравлически гладких труб и рассчитывать λ по эмпирической формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}.$$

Зона III соответствует значениям чисел Рейнольдса в диапазоне $30 \cdot d/\Delta \leq Re \leq 500 \cdot d/\Delta$. Шероховатость начинает влиять на гидравлическое сопротивление и поэтому $\lambda = f(Re; \Delta/d)$. Зона называется зоной гидравлически шероховатых труб и для расчета рекомендуется использовать формулу Альтшуля:

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

Зона IV соответствует значениям чисел Рейнольдса в диапазоне $Re \geq 500 \cdot d/\Delta$. Эта зона характеризуется развитой турбулентностью потока и называется автомодельной зоной. Под автомодельностью понимается независимость потерь напора h_l от скорости течения (следовательно, и от числа Рейнольдса), и поэтому в этой зоне λ зависит только от относительной шероховатости поверхности трубопровода $\lambda = f(\Delta/d)$.

Так как механическая шероховатость Δ для данного трубопровода является величиной постоянной, то, как следует из формулы Дарси-Вейсбаха, потери напора по длине в этом случае пропорциональны квадрату средней скорости течения жидкости в трубопроводе. Поэтому зону III иногда называют зоной квадратичного сопротивления. В ней коэффициент сопротивления рассчитывают по формуле

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

Приведенные формулы для расчета коэффициента гидравлического сопротивления получены на основе опытных данных и дают при расчетах хорошие результаты. Вместе с тем, существует еще целый ряд аналогичных формул полученных различными исследователями, которые приведены в справочной литературе и тоже могут быть использованы в расчетах

при определенных условиях.

В отсутствие потерь в местных сопротивлениях полные потери напора в трубопроводе равны потерям на трение и могут быть определены, как следует из уравнения Бернулли, по разности полных напоров в начале и в конце исследуемого участка трубопровода:

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

Это позволяет экспериментально определить потери напора на трение в реальном трубопроводе, не имеющем местных сопротивлений. Для этого необходимо в начале трубопровода и в конце его установить измерительные приборы — трубки Пито, разность показаний которых и будет равна потерям напора по длине трубопровода h_l .

Для трубопровода постоянного сечения скорости, а, следовательно, и скоростные напоры в начале и в конце будут равны, и поэтому потери напора по длине можно определить как разность пьезометрических напоров по показаниям пьезометров. Именно такой способ экспериментального определения потерь напора на трение использован в настоящей лабораторной работе.

2. Цель работы

Целью работы является экспериментальная проверка расчетных формул для определения коэффициента гидравлического сопротивления λ при движении жидкости в трубопроводе в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

3. Описание рабочего участка

Рабочий участок представляет собой отрезок прямолинейного, горизонтально расположенного трубопровода квадратного сечения и расположен в блоке гидравлических сопротивлений, установленном в столешнице универсального гидравлического стенда (см. ч. II практикума). Сторона квадрата поперечного сечения канала рабочего участка равна 0,01 м. Блок сопротивлений выполнен из прозрачного материала и шероховатость внутренних стенок его каналов составляет $5 \cdot 10^{-5}$ м.

В начале и конце рабочего участка, на расстоянии 1 м друг от друга, гибкими шлангами подсоединены два пьезометра, установленные на лицевой стороне напорного бака универсального гидростенда (пьезометры 2 и 3, соответственно).

Открытие движения жидкости по рабочему участку и регулировка ее расхода осуществляется с помощью вентиля, расположенного непосредственно под столешницей рядом с левой передней стойкой лабораторного стенда.

4. Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство рабочего участка и опробовать его в работе.
2. Открыть регулировочный вентиль и установить минимальный расход жидкости в трубопроводе (разность показаний пьезометров на рабочем участке не должен превышать 5 – 7 мм).
3. Снять показания пьезометров, расположенных в начале и в конце рабочего участка (пьезометры 2 и 3, соответственно) и занести в таблицу результатов эксперимента.
4. Измерить расход жидкости объемным способом и занести данные в таблицу результатов эксперимента.
5. С помощью регулировочного вентиля увеличить расход воды и провести еще 2 измерения по п.п. 2 – 4 при различных расходах, включая максимально возможный (ВНИМАНИЕ: не допускать образования в трубопроводе воздушных пузырей и разрывов потока!).

5. Обработка результатов

1. По разности показаний пьезометров вычислить потери напора в трубопроводе для всех проведенных опытов $\Delta h = (h_1 - h_2)$.
2. Пользуясь полученными значениями расхода Q_v , вычислить для каждого опыта значения средней скорости, чисел Рейнольдса и экспериментальные значения коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda_{\text{эксп}}$ (предварительно преобразовав формулу Дарси-Вейсбаха относительно λ).
3. Исходя из шероховатости внутренней поверхности трубопровода рассчитать критические значения чисел Рейнольдса, разграничивающие зоны гидравлического трения.
4. Сопоставив полученные в опытах числа Рейнольдса с их критическими значениями, определить к какой зоне гидравлического трения относится режим течения в каждом опыте. Выбрать для этого случая соответствующую формулу для расчета коэффициента гидравлического сопротивления.
5. По выбранной формуле рассчитать значения коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda_{\text{расч}}$ для каждого опыта, сравнить их с экспериментальными (определить относительную погрешность) и сделать вывод об их соответствии.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит цель проведения лабораторной работы?
2. Каков порядок выполнения лабораторной работы?
3. Как можно экспериментально определить потери напора по длине трубопровода на практике?
4. По какой формуле рассчитывают потери напора по длине трубопровода?

5. Какие параметры определяют выбор формулы для расчета коэффициента гидравлического сопротивления?
6. От каких параметров зависит величина коэффициента гидравлического сопротивления в общем случае?
7. Какие зоны гидравлического трения вы знаете, и от каких параметров зависит коэффициент гидравлического трения в каждой из этих зон?
8. Какую зону гидравлического трения называют зоной квадратичного сопротивления и почему?
9. Почему при экспериментальном определении потерь по длине в лабораторной работе используют показания пьезометров, а не трубок Пито?
10. Какие изменения надо внести в расчетные формулы для вычисления потерь на трение в трубопроводе не круглого поперечного сечения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

1. Потери напора в местных сопротивлениях

Гидравлические потери напора возникают не только из-за потерь на трение на прямых участках трубопровода, но и во всех других участках, где изменяется конфигурация и (или) направление потока. Эти участки называются местными сопротивлениями.

Местные сопротивления создаются фасонными частями и арматурой трубопроводов. К их числу относятся отводы, задвижки, вентили, и т.п. элементы. При протекании жидкости через местные сопротивления поток деформируется и изменяет свою скорость что, как правило приводит к возникновению вихреобразных течений. Это вызывает необратимую потерю энергии, которая расходуется, в основном, на поддержание непрерывного вращательного движения жидкости в циркуляционных зонах. Теоретически описать течение жидкости в местных сопротивлениях и рассчитать потери напора, как правило, не представляется возможным. В основе определения потерь напора в местных сопротивлениях лежит эксперимент.

В общем случае местные потери определяются по формуле Вейсбаха

$$h_m = \xi_m \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g},$$

где ξ_m — коэффициент местного сопротивления.

Каждое местное сопротивление характеризуется своим значением коэффициента сопротивления ξ_m . В общем случае коэффициент ξ_m зависит от целого ряда факторов — размеров, формы, материала и качества внутренней поверхности местного сопротивления, а также от свойств жидкости и скорости течения. Поэтому значения коэффициентов местных сопротивлений получают опытным путем. Эти значения приведены в обширной справочной литературе.

Однако для некоторых частных случаев значения коэффициентов местных сопротивлений получены теоретическим путем и хорошо согласуются с опытными данными.

Таким местным сопротивлением является внезапное расширения потока, для которого справедлива формула:

$$\xi_{\text{вн.р}} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2,$$

где S_1 и S_2 — площади поперечного сечения до и после внезапного расширения, соответственно.

Для случая внезапного сужения в практических расчетах также можно использовать теоретическую зависимость:

$$\xi_{\text{вн.с}} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_2}{S_1} \right),$$

где S_1 и S_2 — площади поперечного сечения до и после внезапного сужения, соответственно.

Экспериментальное определение потерь напора в местном сопротивлении производится на основании уравнения Бернулли. Из уравнения Бернулли, составленного для сечений, находящихся непосредственно перед и за местным сопротивлением, следует, что потери напора в местном сопротивлении равны разности полных напоров в этих сечениях:

$$h_M = h_{1-2} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} \right).$$

При турбулентном течении, которое, как правило, существует в местных сопротивлениях, $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ и тогда записанное выше выражение можно привести к следующему виду:

$$h_M = (h_1 - h_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g},$$

где h_1 и h_2 — пьезометрические напоры соответственно перед и после местного сопротивления.

Если на входе в местное сопротивление и на выходе из него установить измерительные приборы — трубки Пито, то разность их показаний будет равна потерям напора в местном сопротивлении h_M . Если же на входе и выходе местного сопротивления сечения одинаковы, то достаточно установить пьезометры, разность показаний в которых даст тот же результат.

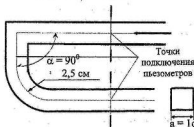
2. Цель работы

Целью работы является экспериментальное определение коэффициентов местных сопротивлений различной конфигурации, а также проверка теоретических расчетных формул, используемых для случаев внезапного расширения и сужения потока.

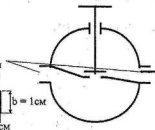
3. Описание рабочего участка

Рабочий участок представляет собой набор различных местных сопротивлений, расположенных последовательно в потоке жидкости, протекающем в блоке гидравлических сопротивлений. Блок гидравлических сопротивлений выполнен из прозрачного материала и установлен горизонтально в столешнице универсального лабораторного стенда. Схемы местных сопротивлений, которые входят в состав рабочего участка, приведены на рис. 2.

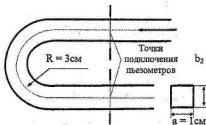
Комбинация резкого и
плавного поворотов



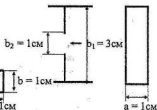
Имитация вентиля



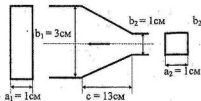
Плавный поворот α = 180°



Диафрагма



Диффузор



Конфузор

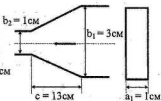


Рис. 2. Виды местных сопротивлений, исследуемых на лабораторном стенде

На входе в каждое местное сопротивление и на выходе из него с помощью гибких шлангов подсоединены пьезометры. Все пьезометры конструктивно объединены в единый блок и расположены на лицевой стенке напорного бака. Для удобства пользования, пьезометры пронумерованы и их номера соответствуют номерам точек подсоединения, расположенных на блоке гидравлических сопротивлений.

По показаниям пьезометров в опыте можно определить потери пьезометрического напора на местном сопротивлении, а потери скоростного напора следует определять расчетным путем исходя из средней скорости потока в рабочем участке.

Открытие движения жидкости по рабочему участку и регулировка расхода осуществляется с помощью вентиля, расположенного непосредственно под столешницей рядом с левой передней стойкой лабораторного стенда (как и в предыдущей лабораторной работе).

4. Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство рабочего участка и опробовать его в работе.
2. Открыть регулировочный вентиль и установить некоторый средний расход жидкости (ВНИМАНИЕ: не допускать образования в каналах рабочего участка воздушных пузырей и разрывов потока, а также следить за тем, чтобы уровни жидкости во всех пьезометрах находились в зоне видимости наблюдений!).
3. Снять показания пьезометров h_1 и h_2 , расположенных в начале и в конце каждого из исследуемых местных сопротивлений (по указанию преподавателя) и занести в таблицу результатов эксперимента.
4. Измерить расход жидкости и занести данные в таблицу результатов эксперимента.
5. Нарисовать эскизы исследованных местных сопротивлений с указанием их размеров.

5. Обработка результатов

1. Пользуясь полученными значениями расхода Q_v , вычислить для каждого исследованного местного сопротивления значения средних скоростей, чисел Рейнольдса и скоростных напоров перед и после местного сопротивления.
2. Вычислить потери напора в каждом из исследованных местных сопротивлений, как разность полных напоров между сечениями, расположенными перед и после местного сопротивления.
3. Пользуясь формулой Вейсбаха, вычислить значения коэффициентов местных сопротивлений и сравнить их с имеющимися справочными данными. Для случаев внезапного расширения и внезапного сужения потока провести расчет коэффициентов этих местных сопротивлений по теоретическим формулам.

4. Сравнить полученные расчетные значения с экспериментальными и сделать вывод об их соответствии (рассчитать относительную погрешность).

Контрольные вопросы

1. В чем состоит цель проведения лабораторной работы?
2. Каков порядок выполнения лабораторной работы?
3. Что называется местными сопротивлениями, и чем обусловлены потери напора в них?
4. От чего зависят значения коэффициентов местных сопротивлений в самом общем случае?
5. Каким путем, как правило, определяются значения коэффициентов местных сопротивлений?
6. По какой формуле определяются потери напора на местном сопротивлении при движении жидкости в трубах?
7. По каким формулам определяются коэффициенты местного сопротивления при внезапном расширении и внезапном сужении потока?
8. Какую скорость нужно подставить в формулу Вейсбаха для определения потери напора на местном сопротивлении при движении жидкости в трубах?
9. От чего зависят коэффициенты местного сопротивления при внезапном расширении и внезапном сужении трубопровода?
10. Для каких местных сопротивлений (из входящих в состав блока гидравлических сопротивлений стенда) учет скоростных напоров при экспериментальном определении потерь не обязателен и почему?
11. На чем основан экспериментальный способ определения величины потерь напора в местных сопротивлениях?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ

1. Истечение жидкости через отверстия и насадки

В гидравлике различают истечение жидкости через отверстия в тонкой и толстой стенках. Отверстием в тонкой стенке называется такое отверстие, толщина стенки которого не влияет на форму струи и условия истечения жидкости. Истечение через отверстие в толстой стенке рассматривается как истечение через насадок.

Отверстия бывают малые и большие. Малым отверстием считается отверстие, у которого диаметр (для некруглого отверстия – высота) составляет не более 10% действующего напора, т.е. $d_0 \leq 0,1 H$ (см. рис.3).

Отдельные частицы жидкости, движущиеся ко входу в отверстие по криволинейным траекториям. Поэтому в результате действия на них центробежных сил инерции происходит сжатие струи до диаметра, меньшего, чем диаметр отверстия. На некотором расстоянии от стенки ($\sim 0,5 \cdot d_0$) струя максимально сжимается до диаметра d и образуется так называемое сжатое сечение (рис. 3). Далее струя падает под действием силы тяжести, изменяя форму своего поперечного сечения (это явление называется инверсией струи).

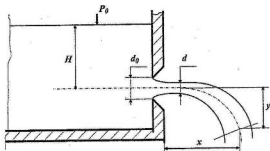


Рис. 3. Схема истечения через отверстия

Расход жидкости через отверстия определяется по формуле

$$Q_V = \mu \cdot S_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H},$$

где H – напор, м;

S_0 – площадь отверстия, м²;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

μ – коэффициент расхода, 1.

Отношение площади сжатого сечения струи к площади отверстия называется коэффициентом сжатия струи $\varepsilon = \frac{S}{S_0}$.

Действительная скорость истечения v вследствие сопротивления всегда меньше теоретической v_0 . Отношение действительной скорости истечения к теоретической называется коэффициентом скорости $\varphi = \frac{v}{v_0}$.

Теоретическая скорость истечения определяется из выражения

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}.$$

Действительная скорость истечения может быть определена по координатам x и y центра тяжести струи в месте ее падения

$$v = x \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot y}}.$$

Коэффициент расхода μ характеризует отношение действительного объемного расхода к теоретическому $\mu = \frac{Q_v}{Q_{v_0}}$.

Так как $Q_{v_0} = S_0 \cdot v_0$, и $Q_v = S \cdot v$, то $\mu = \varepsilon \cdot \varphi$.

Коэффициенты φ , ε , μ , а также коэффициент гидравлического сопротивления отверстия ξ называются коэффициентами истечения. Они зависят от формы отверстия и числа Рейнольдса, их численные значения приведены в справочной литературе. При числах Рейнольдса $Re > 10^5$ зависимость коэффициентов истечения от Re становится незначительной и для расчетов истечения через круглое отверстие в тонкой стенке можно пользоваться их средними значениями: $\varphi = 0,97$; $\varepsilon = 0,63$; $\mu = 0,61$.

Насадком называется короткая цилиндрическая труба (длиной 3 – 4 диаметра отверстия), присоединенная к отверстию в тонкой стенке. Различают три основных типа насадков (рис. 4): цилиндрический (внешний (а) и внутренний (б)), конический (сходящийся (в) и расходящийся (г)) и конoidalный (д).

Приведенные выше формулы применимы и при истечении жидкости через насадки, но коэффициенты истечения имеют другие численные значения. Значения коэффициентов истечения для основных типов насадков приведены в табл. 1.

Как следует из приведенных в таблице численных значений коэффициента расхода μ , расход жидкости через насадок (кроме конического расходящегося) больше, чем через простое отверстие. Это объясняется тем, что в насадке также как и при истечении через отверстие происходит сжатие струи, которое из-за отсутствия связи насадка с атмосферой приводит к образованию внутри него вакуума. В результате действующий напор как

бы увеличивается, что соответственно приводит к увеличению расхода.

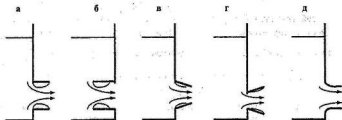


Рис. 4. Основные типы насадков

Таблица 1
Значения коэффициентов истечения для круглого отверстия и насадков различных типов

Тип насадка	ϵ	ϕ	μ	ξ
Круглое отверстие	0,63	0,97	0,61	0,06
Внешний цилиндрический насадок (насадок Вентури)	1	0,82	0,82	0,5
Внутренний цилиндрический насадок	1	0,707	0,707	1
Конический, расходящийся под углом $\beta = 5 + 7^\circ$	1	0,45	0,45	$4 + 3$
Конический, сходящийся под углом $\beta = 13 + 23^\circ$	0,98	0,96	0,94	$0,06 + 0,09$
Конический	1	0,98	0,98	0,04

2. Цель работы

Целью работы является изучение истечения жидкости через отверстия и насадки различной формы и экспериментальное определение коэффициентов истечения.

3. Описание рабочего участка

Основу рабочего участка составляет набор моделей отверстий в тонкой стенке и насадков различной конфигурации. Все модели смонтированы на поворотной турели, расположенной на левой боковой стенке напорного бака. Для включения выбранного вида насадка в работу необходимо

ослабить прижимной винт турели (расположен на ее оси) и, повернув турель, установить выбранный тип насадка строго напротив отверстия напорного бака, а затем вновь затянуть прижимной винт.

Пуск воды через насадок осуществляется поворотом рукоятки затвора (расположена на крышке напорного бака) по часовой стрелке.

Примечание: при пуске воды необходимо на мгновение закрыть насадок рукой, чтобы струя полностью заполнила выходное сечение насадка.

Вода, выливаясь из насадка, попадает в сливной лоток, а затем в систему измерения расхода жидкости. На сливном лотке установлена измерительная линейка, позволяющая определить координату x , характеризующую дальность полета струи и необходимую для расчета коэффициента скорости ϕ .

4. Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство рабочего участка и опробовать его в работе.
2. Поворотом турели совместить модель отверстия в тонкой стенке с выходным отверстием напорного бака и, плотно затянув прижимной винт турели, обеспечить герметичность их соединения.
3. Поворотом рукоятки затвора открыть отверстие для входа воды.
4. Замерить и записать в таблицу результатов эксперимента следующие величины: напор в баке; дальность и высоту падения струи x и y , (принять за точку отсчета пересечение оси струи с поверхностью сливного лотка); расход жидкости.
5. Перекрыть выход воды из отверстия, повернув турель, поменять отверстие в тонкой стенке на насадок (по указанию преподавателя) и повторить опыт еще раз.

5. Обработка результатов

1. Вычислить теоретическую и действительную скорости истечения.
2. Рассчитать значения коэффициентов истечения ϕ , ϵ , μ .
3. Исходя из действительной скорости истечения, рассчитать число Рейнольдса.
4. Вычислить по формуле теоретический расход воды.
5. Проанализировать результаты и, рассчитав отклонения экспериментальных и справочных значений расхода, скорости и коэффициентов истечения, сделать вывод об их соответствии.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит цель проведения лабораторной работы?
2. Каков порядок выполнения лабораторной работы?
3. Какие действия необходимо провести для смены вида исследуемого насадка?

4. В чем причина сжатия струи при ее истечении из отверстия?
5. Как соотносятся между собой расходы при истечении жидкости из отверстия в тонкой стенке и из цилиндрического насадка (больше, меньше или равны) при прочих одинаковых условиях истечения?
6. Что характеризует коэффициент скорости φ ?
7. Что характеризует коэффициент расхода μ ?
8. Что характеризует коэффициент сжатия струи ϵ ?
9. Почему коэффициент расхода для большинства насадков больше, чем коэффициент расхода для отверстия в тонкой стенке?
10. Что называется инверсией струи?
11. Какие отверстия называются малыми?
12. Что называется насадком?
13. По какой формуле можно рассчитать расход жидкости при ее истечении из отверстий и насадков?
14. Какая связь существует между коэффициентами истечения?
15. Как определить действительную скорость истечения жидкости из отверстия или насадка?

Библиографический список

1. Осипов П.Е. Гидравлика, гидравлические машины и гидропривод. М., Лесная промышленность, 1981. - 424 с.
2. Обливин А.Н., Прокофьев Н.С., Киприянов А.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник. - М.: МГУЛ, 2002.- 656 с.
3. Лебедев Н.И. Гидравлика, гидравлические машины и объемный гидропривод. Учебное пособие. - М.: МГУЛ, 2000. - 232 с.
4. Гидравлика. Ч. 1. Гидростатика: учеб.-методич. пособие / Г.Н. Афанасьев, А.С. Савицкий, А.А. Шевляков и др. - 2-е изд. - М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. - 16 с.
5. Гидравлика. Ч. 2. Гидродинамика: учеб.-методич. пособие / Г.Н. Афанасьев, А.С. Савицкий, А.А. Шевляков и др. - 3-е изд. - М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. - 21 с.
6. Гидравлика. Ч. 1: журнал для лабораторных работ - М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2006. - 16 с.

Оглавление

Введение	3
Лабораторная работа № 4	
Определение постоянной расходомера Вентури	4
Лабораторная работа № 5	
Определение коэффициента гидравлического сопротивления при движении жидкости в трубопроводе	8
Лабораторная работа № 6	
Определение коэффициентов местного сопротивления	13
Лабораторная работа № 7	
Исследование истечения жидкости через отверстия и насадки	18
Литература	23

