

Министерство образования и науки Российской Федерации

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

**Лабораторный практикум по разделу
«Гидравлические процессы»
курса «Процессы и аппараты
химической технологии»**

*Методические указания для студентов
специальности 250400-«Химическая технология
природных энергоносителей и углеродных
материалов»*

Саратов 2009

УДК 66.011 (076)

ББК

Лабораторный практикум по разделу «Гидравлические процессы» курса «Процессы и аппараты химической технологии»: методические указания для студентов специальности 250400 / сост. Печенегов Ю.Я., Кузьмина Р.И., Болбатов А.А. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2009. - 31с., ил.

Составители: *Печенегов Юрий Яковлевич, Кузьмина Раиса Ивановна, Болбатов Алексей Александрович*

Рецензенты: кафедра МАХП Казанского государственного технологического университета (зав. каф. д.т.н., профессор *С.И. Поникаров*); к.т.н., доцент *В.П. Бирюков*

В методических указаниях приведены описания лабораторных работ по определению режимов движения потока (работа №1), исследованию опорожнения сосуда непризматической формы (работа №2), исследованию коэффициента гидравлического трения (работа №3), определению коэффициентов местных сопротивлений (работа №4), определению коэффициента расхода и построение тарировочной кривой расходомера Вентури (работа №5)

ISBN

© Печенегов Ю.Я., Кузьмина Р.И.,
Болбатов А.А., 2009

© Саратовский государственный
университет, 2009

Введение

Целью лабораторного практикума по курсу « Процессы и аппараты химической технологии» (ПАХТ) является познание физических закономерностей процессов, определение их основных технологических параметров и факторов, влияющих на интенсивность протекания процессов и производительность оборудования.

Лабораторные занятия способствуют более глубокому усвоению лекционного курса, развитию навыков самостоятельного научного исследования, а также овладению методикой измерений и обработки экспериментальных данных.

Перед каждой лабораторной работой студент обязан проработать соответствующие теоретические части курса по рекомендуемой литературе и данному руководству, знать цель работы, сущность процессов изучаемого явления, порядок проведения исследования и необходимых вычислений.

Преподаватель, ведущий занятия, прежде чем допустить студента к работе, проверяет его подготовку.

Лабораторная работа выполняется каждым студентом самостоятельно или небольшой группой (по указанию преподавателя). Результаты исследований с соответствующими расчетами студент должен показать преподавателю и только после этого приступить к оформлению отчета.

Отчет по выполненной работе оформляется каждым студентом в специальной тетради или на отдельном листе. В отчете указывается:

- 1) ФИО студента и учебная группа;
- 2) Название лабораторной работы;
- 3) Цель работы;
- 4) Схема лабораторной установки;
- 5) Протокол испытаний (таблица с измерениями);
- 6) Расчетная обработка измерений, получение зависимостей для изучаемого процесса;
- 7) Построение необходимых графиков; формулирование выводов по работе.

Оформление отчета желательно производить в лаборатории непосредственно после выполнения работы или, в крайнем случае, дома в день выполнения работы. Предъявлять его преподавателю для защиты нужно не позже следующего лабораторного занятия.

Студенты, не выполнившие отчет по предыдущей работе или не подготовившиеся к выполнению текущей, к лабораторным занятиям не допускаются. Выполнение лабораторных работ является строго обязательным.

По правильно оформленному отчету студенту предлагается несколько вопросов. При положительном ответе на эти вопросы отчет считается защищенным, а лабораторная работа – зачтенной.

Определение режимов движения потока

Общие положения и цель работы

Исследованиями установлено, что для реальных (вязких) жидкостей существуют два резко различного вида движения - ламинарное (слоистое) и турбулентное (вихревое).

Ламинарным называется такой режим, при котором поток движется отдельными струйками и траектории частиц жидкости между собой не пересекаются, а турбулентным - когда струйчатость потока нарушается, и частицы жидкости совершают хаотичное движение.

Характер движения, как показали опыты, зависит от скорости движения, вязкости, плотности жидкости и геометрических размеров потока.

Влияние перечисленных параметров потока на характер движения определяется величиной безразмерного комплекса, называемого критерием Рейнольдса

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

где w – скорость потока, м/с;

d – диаметр трубопровода, м;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

μ – динамический коэффициент вязкости, Н·с/м².

Опыты с различными жидкостями показали, что смена режимов движения происходит при определенном значении числа Рейнольдса, называемого критическим $Re_{кр}$.

Скорость, при которой происходит переход от одного режима к другому, называется критической.

При постепенном ускорении движение сохраняется ламинарным только до определенной скорости – «верхней критической», - после которой

наступает турбулентный режим. При проведении опытов в обратном порядке турбулентный режим сохраняется до скорости, называемой «нижней критической», и переходит в ламинарный

$$w_{крн} < w_{крв}$$

«Нижней» и «верхней» критическим скоростям соответствуют «нижний» и «верхний» критерии Рейнольдса.

Для прямых и гладких труб гладкого сечения

$$Re_{крн} = 2320;$$

$$Re_{крв} = 10000.$$

Следовательно, при значениях $Re < 2320$ возможен только ламинарный режим движения, а если $Re > 10000$ – турбулентный.

В области, для которой $2320 < Re < 10000$, возможны оба режима – турбулентный и ламинарный. Эта область является неустойчивой и называется «переходной».

Характер движения рассматриваемого потока имеет решающее значение в расчетах, связанных с движением жидкости или газа.

Цель работы: ознакомление с изменениями, проходящими в потоке при различных режимах движения, и вычисление критериев Рейнольдса, соответствующих установленным режимам.

Описание лабораторной установки

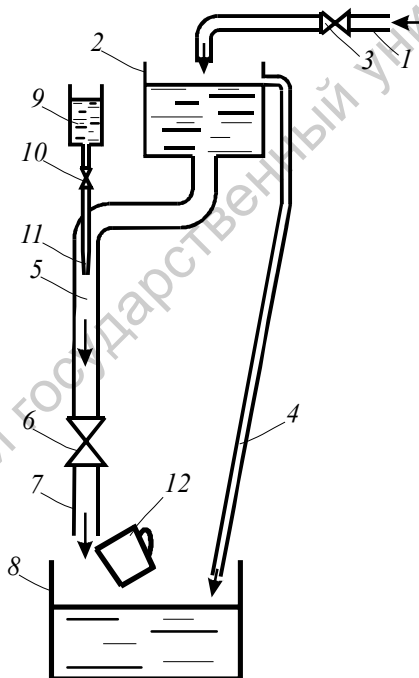


Рис. 1. Схема лабораторной установки для определения режимов движения потока: 1-водопровод; 2-напорный бак; 3-кран; 4-сливная труба; 5-стеклянная труба; 6, 10-запорно-регулирующие краны; 7-штуцер; 8-приемный бак; 9-сосуд с раствором краски; 11-тонкая трубка для выпуска раствора краски; 12-мерная емкость

Схема установки приведена на рис. 1. Из городского водопровода 1 подают воду в напорный бак 2, регулируя подачу краном 3. Для

предупреждения переполнения бака и поддержания в нем постоянного уровня воды установлена переливная труба 4.

Во время работы установки вода из напорного бака 2 поступает в стеклянную трубку 5, снабженную запорно-регулирующим краном 6 и штуцером 7 для выпуска воды в приемный бак 8.

Одновременно из сосуда 9 через запорно-регулирующий кран 10 и, установленную по оси стеклянной трубы 5, тонкую трубку 11 подается окрашенный раствор.

Расход воды через стеклянную трубу 5 определяется с помощью мерной емкости 12.

Порядок выполнения работы

Перед началом работы необходимо проверить наличие воды в баке 2. Если ее недостаточно, открывается вентиль 3 и бак заполняется водой. Во время проведения работы уровень воды в баке 2 поддерживается постоянным. Это обеспечивается путем непрерывного удаления избытка воды через сливную трубу 4 в приемный бак 8.

Затем открывается вентиль 6 и устанавливается небольшой расход воды в трубе 5. Открытием вентиля 10 регулируется поступление окрашенной жидкости таким образом, чтобы она вытекала в трубку в виде тонкой струйки. Изменением расхода воды в трубке устанавливаются последовательно ламинарный, переходный, турбулентный режимы движения жидкости.

При каждом режиме замеряется расход воды. Для этого под штуцер 7 подставляется мерная емкость и по секундомеру замечается время заполнения емкости. Температура воды измеряется жидкостным термометром в приемном баке 8.

После проведения всех измерений производится обработка полученных результатов.

1. Определяется скорость движения воды в стеклянной трубе

$$w = \frac{V}{0.785d^2\tau}, \text{ м/с,}$$

где V - количество воды, поступившей в мерную емкость, м^3 ;

d - диаметр стеклянной трубы, равен $0,013 \text{ м}$,

τ - время заполнения мерной емкости, с .

2. Значения критерия Рейнольдса определяются по формуле

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

Результаты наблюдений, опытные и расчетные данные заносятся в табл. 1.

Таблица 1

Опытные и расчетные результаты

№ опыта	Время заполнения мерной емкости $\tau, \text{с}$	Объем поступившей воды $V, \text{м}^3$	Температура воды $t, \text{°C}$	Динамический коэффициент вязкости $\mu, \text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$	Скорость движения воды $w, \text{м/с}$	Re	Состояние окрашенной струйки	Режим потока
1								
2								
3								
...								

Значения ρ и μ в зависимости от температуры берутся из таблицы П-1 (приложение).

При увеличении скорости течения жидкости по трубе наблюдаются следующие изменения окрашенной струйки:

а) при малых скоростях течения воды окрашенная струйка не размывается, имея вид натянутой нити (ламинарный режим);

б) при увеличении скорости окрашенная струйка приобретает волнистые очертания, наблюдаются отдельные мелкие струи красителя (переходная область);

в) при достаточно большой скорости движения струйки краски полностью размываются, окраска жидкости монотонная (турбулентный режим).

Устойчивый режим движения устанавливается на расстоянии $l=40d$ трубы от ввода жидкости.

Контрольные вопросы

1. Определение режимов движения потока.
2. Что называется критической скоростью?
3. Критерий Re и его физический смысл.
4. Критическое значение критерия Re .
5. График распределения скоростей по сечению трубопровода при различных режимах.
6. Определение эквивалентного диаметра.
7. Понятие мгновенной и средней скорости.
8. Уравнение расхода.
9. Размерность ρ и μ в различных системах.
10. Структура потока (ядро, пограничный слой).

Исследование опорожнения сосуда непризматической формы

Общие положения и цель работы

При решении гидравлических задач истечения жидкости из резервуаров возникает необходимость определить время, за которое уровень жидкости изменится на заданную величину, вытечет определенный объем жидкости и т.д.

При истечении жидкости из сосуда ее уровень h понижается во времени τ и, следовательно, уменьшается также скорость истечения w , т.е. процесс истечения носит нестационарный характер.

За малый отрезок времени $d\tau$ из сосуда вытекает количество жидкости dV и уровень жидкости в сосуде изменится при этом на величину dh . Очевидно, что

$$dV = -fdh,$$

где f – площадь поперечного сечения сосуда.

Знак минус в правой части указывает на уменьшение высоты жидкости в сосуде.

С другой стороны, истечение жидкости через отверстия и насадки, как это следует из уравнения Бернулли, определяется зависимостью

$$dV = \mu f_0 \sqrt{2gh} \cdot d\tau,$$

где μ – коэффициент расхода насадка; g – ускорение в поле тяжести, равно $9,81 \text{ м}^2/\text{с}$; h – высота уровня жидкости в сосуде относительно центра насадка; f_0 – площадь поперечного сечения насадка.

Приравнявая, согласно условию неразрывности потока, эти объемы dV , получим

$$\mu f_0 \sqrt{2gh} \cdot d\tau = -fdh,$$

откуда

$$d\tau = -f dh / (\mu f_0 \sqrt{2gh}).$$

Интегрирование последнего уравнения дает

$$\tau = -\frac{1}{\mu f_0 \sqrt{2g}} \int_{h_1}^{h_2} \frac{f}{\sqrt{h}} dh. \quad (1)$$

Если известен закон изменения площади свободной поверхности жидкости от напора $f=f(h)$, то полученное выражение для τ дает возможность определить время опорожнения резервуара от отметки h_1 до отметки h_2 .

В частном случае, когда $f=const$, сосуд называется призматическим и

$$\tau = \frac{f}{\mu f_0 \sqrt{2g}} \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{\sqrt{h}} = -\frac{f}{\mu f_0 \sqrt{2g}} 2\sqrt{h} \Big|_{h_1}^{h_2} = \frac{2f(\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2})}{\mu f_0 \sqrt{2g}}.$$

Цель работы: Определить

время опорожнения резервуара опытным путем и сравнить его с расчетным.

Описание лабораторной установки

Схема установки приведена на рис. 2. Установка имеет общий с лабораторным стендом к работе №1 расходный бак 1, в который вода подается из городского водопровода 2 через кран 3. Сосуд 5 с криволинейными боковыми стенками снабжен пьезометрической трубкой 6 и выпускным штуцером 7 с краном 8. Под штуцером 7 расположена воронка 9 для отвода воды в приемный бак 10, общий с лабораторным стендом к работе №1. Общей является и переливная труба 11.

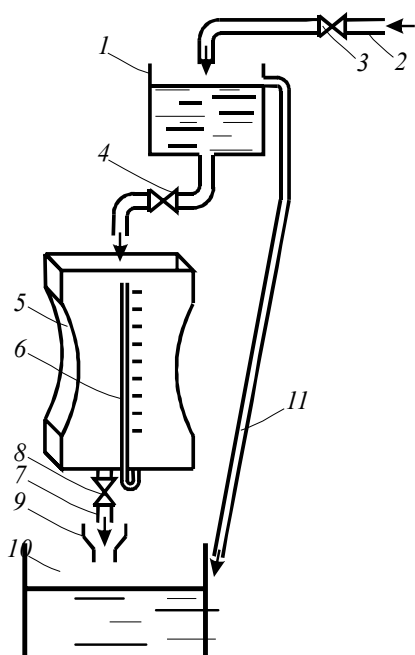


Рис. 2. Схема лабораторной установки для исследования опорожнения сосуда непрямоугольной формы: 1-расходный бак; 2-водопровод; 3, 4, 8-краны; 5-непрямоугольный сосуд; 6-пьезометр; 7-штуцер выпускной; 9-воронка; 10-приемный бак; 11-переливная труба

Порядок проведения работы

Сосуд 5 при открытии крана 4 наполняется водой до заданной преподавателем метки h_1 шкалы пьезометра 6. Полностью открывается кран 8 и фиксируется время τ за которое уровень жидкости в сосуде понизится до нижней метки h_2 шкалы пьезометра, которая также задается преподавателем.

Далее определяется расчетное время опорожнения сосуда от уровня h_1 до уровня h_2 по формуле (1). В расчетах принимается коэффициент расхода $\mu=0,82$ и площадь поперечного сечения выпускного насадка $f_0=0,5 \text{ см}^2$.

Интеграл в правой части уравнения (1) может быть вычислен по формулам численного интегрирования, например по формуле трапеций

$$\int_a^b y dx = \frac{(b-a)}{2n} (y_0 + 2y_1 + 2y_2 + \dots + 2y_{n-1} + y_n),$$

где n – число участков, на которые делится отрезок ab ; $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$ – значения подынтегральной функции на границах соответствующих участков.

Если отрезок от $a=h_1$ до $b=h_2$ разбить на n участков одинаковой длины Δh , то получим

$$-\int_{h_1}^{h_2} \frac{f}{\sqrt{h}} dh = \frac{h_1 - h_2}{2n} \left(\frac{f_{h_1}}{\sqrt{h_1}} + \frac{2f_{h_1-\Delta h}}{\sqrt{h_1-\Delta h}} + \frac{2f_{h_1-2\Delta h}}{\sqrt{h_1-2\Delta h}} + \dots + \frac{2f_{h_1-(n-1)\Delta h}}{\sqrt{h_1-(n-1)\Delta h}} + \frac{f_{h_2}}{\sqrt{h_2}} \right).$$

Значениям h_i на установке соответствуют следующие значения f_i :

$h,$ см	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
$f,$ см ²	293,3	257,9	232,9	214,3	195,5	178,9	167,4	153,9	145,6	141,4	133,1	129,0	125,8	123,8	122,3	120,6

$h,$ см	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
$f,$ см ²	122,3	123,8	125,8	129,0	133,1	141,4	145,6	153,9	167,4	178,9	195,5	214,3	232,9	257,9	293,3	293,3

Определяется расхождение опытного τ_{on} и расчетного τ_p времени опорожнения

$$\Delta = \frac{\tau_{on} - \tau_p}{\tau_{on}} \cdot 100\%.$$

Опытные и расчетные данные заносятся в таблицу 1.

Таблица 1.

Опытные и расчетные результаты

№ n/n	$h_1, \text{см}$	$h_2, \text{см}$	$\tau_{on}, \text{с}$	n	$\tau_p, \text{с}$	$\Delta, \%$
1						
2						
...						

Контрольные вопросы

1. Что такое коэффициент расхода?
2. Вид дифференциального уравнения неразрывности для опорожнения сосуда непризматической формы.
3. Какие методы приближенного вычисления интегралов Вам известны?
4. Какое движение называется неустановившимся?
5. Запишите выражения для определения времени опорожнения сосуда непризматической формы.
6. Что называется напором жидкости?
7. Что называется расходом жидкости?

Исследование коэффициента гидравлического трения

Общие положения и цель работы

При проектировании технологических установок необходимо знать гидравлические сопротивления прохождению потоков по коммуникациям и через отдельные аппараты. Расчет гидравлических сопротивлений определяет выбор давления, необходимого для транспортирования жидкостей и газов, а, следовательно, и выбор насосов, компрессоров и вентиляторов.

На преодоление гидравлического сопротивления расходуется часть или весь напор движущейся жидкости. Одна из составляющих потери напора h_{mp} (или давления $\Delta P_{mp} = \rho g h_{mp}$) определяется в инженерных расчетах по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h_{mp} = \lambda \frac{w^2 l}{2g d_s}, \text{ м или } \Delta P_{mp} = \lambda \frac{\rho w^2 l}{2 d}, \text{ Па,} \quad (1)$$

где l – длина трубы; $d_s = \frac{4f}{\Pi}$ – эквивалентный диаметр; w – средняя скорость; λ – коэффициент гидравлического трения; g – ускорение свободного падения; f – площадь поперечного сечения канала; Π – смоченный периметр канала.

Данная составляющая обусловлена наличием трения потока о стенки канала и вязкости жидкости. Для ее расчета необходимо располагать значениями коэффициента гидравлического трения λ .

Если течение жидкости в прямом канале ламинарное ($Re \leq 2300$), то коэффициент гидравлического трения может быть рассчитан по теоретической формуле

$$\lambda = \frac{A}{Re}, \quad (2)$$

где $Re = wd_s \rho / \mu = wd_s / \nu$ – число Рейнольдса; $d_s = 4f / \Pi$ – эквивалентный диаметр канала; μ и ν – динамический и кинематический коэффициенты

вязкости; A – коэффициент зависящий от формы поперечного сечения канала, для круглых труб $A=64$, для труб квадратного сечения $A=57$, для сечения – равносторонний треугольник $A=53$.

При турбулентном режиме течения дополнительное влияние на гидравлическое сопротивление начинают оказывать шероховатость поверхности стенок канала и турбулентная вязкость потока. Коэффициент гидравлического трения здесь рассчитывают по эмпирическим формулам, полученным в результате обработки опытных данных. Известно много формул, в той или иной степени согласующихся между собой.

Удобна для использования в инженерных расчетах формула Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{\Delta}{d_s} \right)^{0,25}, \quad (3)$$

где Δ - средняя высота бугорков шероховатости на стенке.

В технических условиях средняя высота выступов шероховатости Δ равна для цельнотянутых стальных труб - $0,02 \div 0,1$ мм, для бывших в употреблении, незначительно коррозированных - $0,1 \div 0,4$ мм.

Формула Альтшуля, как и всякая другая эмпирическая формула, имеет ограничения по изменению влияющих параметров. Она справедлива для интервала чисел Рейнольдса $\text{Re} = 4 \cdot 10^3 \div 10^6$. При $\text{Re} \frac{\Delta}{d_s} < 10$ (режим гидравлически гладких стенок) формула Альтшуля становится одночленной

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}. \quad (4)$$

Если $\text{Re} \frac{\Delta}{d_s} > 500$ (режим развитой шероховатости стенок), то в формуле

(3) малой величиной становится член $\frac{68}{\text{Re}}$, и в этом случае имеем

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d_s} \right)^{0,25}. \quad (5)$$

Цель работы: опытное определение коэффициентов гидравлического трения λ в круглой трубе при различных скоростях

жидкости; построение графиков зависимости $\lambda=f(Re)$ по опытным и расчетным данным.

Описание лабораторной установки

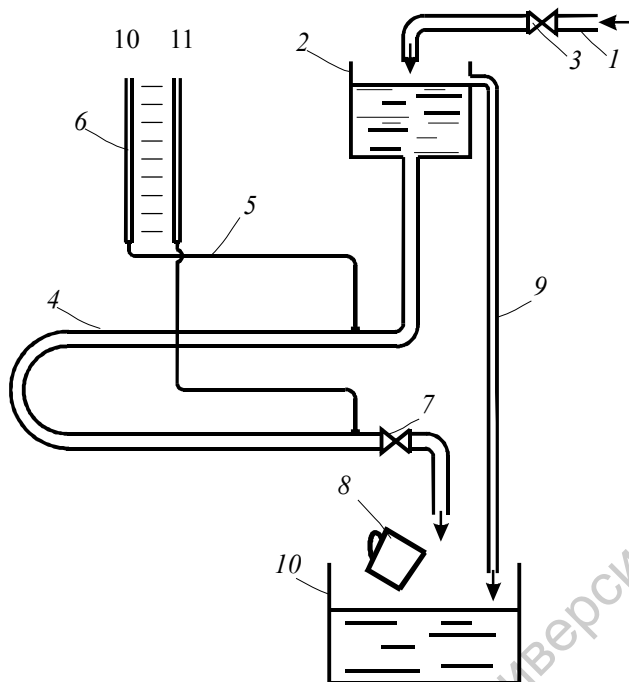


Рис. 3. *Схема лабораторной установки для исследования коэффициента гидравлического трения:* 1-водопровод; 2-расходный бак; 3, 7-краны; 4-опытная трубка; 5-импульсная трубка; 6-пьезометр; 8-мерная емкость; 9-переливная трубка; 10-приемный бак

Схема установки приведена на рис. 3. Вода из водопровода 1 поступает в расходный бак 2, откуда подается в прозрачную опытную трубку 4 с верхним и нижним участками. Во входном и выходном сечениях трубы имеются сверления в стенках, из которых через трубки 5 жидкость поступает к пьезометрам 6 для измерения напора потока. На стенде пьезометры значатся под номерами 10 и 11.

Регулирование расхода воды через опытную трубку 4 осуществляется краном 7, а измерение расхода – с помощью мерной емкости 8.

При работе установки должен поддерживаться постоянный уровень воды в расходном баке 2. Это достигается за счет слива по трубе 9 части избытка подаваемой в бак 2 воды из водопровода 1.

Потоки воды из опытной трубы 4 и переливной трубы 9 поступают в приемный бак 10.

Порядок проведения работы

Убедиться, что вода из водопровода 1 поступает в расходный бак 2 и идет перелив избытка воды через трубу 9.

Медленно открывая кран 7 и наблюдая за показаниями пьезометров 6, прекратить открытие крана 7 при достижении разности уровней столбов жидкости в пьезометрах 6 примерно $10 \div 15$ мм вод. ст. Снять показания пьезометров и измерить расход жидкости с помощью мерной емкости 8.

Далее, постепенно открывая кран 7, устанавливать расходы жидкости ($5 \div 6$ раз до максимального значения) при которых измерить напоры в пьезометрах и величину расхода. При этом нужно наблюдать за наличием стока из переливной трубы 9 и при необходимости увеличивать подачу воды в расходный бак 2, открывая кран 3 на водопроводе 1.

Температура воды измеряется термометром в приемном баке 10.

Результаты измерений заносятся в табл. 1.

После завершения измерений перекрыть кран 3 для подачи воды из водопровода 1.

Обработка опытных данных

Для каждого опытного измерения производятся вычисления в следующем порядке.

1. Расход воды $Q = \frac{V}{\tau}$, м³/с, где V – количество воды, поступившей в мерную емкость, м³; τ – время заполнения мерной емкости, с.

2. Средняя в сечении скорость движения воды в опытной трубе $w = \frac{4Q}{\pi d^2}$, м/с, где d – внутренний диаметр трубы, равен 0,012 м.

3. Число Рейнольдса $Re = \frac{wd\rho}{\mu}$, где ρ – плотность и μ – динамический коэффициент вязкости воды, берутся из табл. П-1 (приложения) при измеренной температуре.

4. Напор, затрачиваемый на преодоление сопротивления трения в опытной трубе $h_{mp} = h_{10} - h_{11}$, м вод. ст., где h_{10} и h_{11} – измеренные уровни в пьезометрах 10 и 11.

5. Опытный коэффициент гидравлического трения $\lambda_{mp} = h_{mp} \frac{2g}{w^2} \frac{d}{l}$, где l – длина опытной трубы по пути следования потока между входным и выходным сечением, равна 2,275 м.

6. Расчетный коэффициент гидравлического трения λ_p определяется в зависимости от величины числа Re по формуле (2) или по (4).

Результаты расчетов заносятся в таблицу 1. На миллиметровой бумаге строятся графики зависимостей $\lambda_{on}=f(Re)$ и $\lambda_p=f(Re)$. При наличии расхождений кривых устанавливается возможная причина различия.

Таблица 1

№ опыта	Показания пьезометров		Температура воды $t, ^\circ C$	Объем поступившей воды $V, м^3$	Время заполнения мерной емкости $\tau, с$	$\mu, Па \cdot с$	$\rho, кг/м^3$	Расход воды $Q, м^3/с$	$w, м/с$	Re	$h_{mp}, м вод. ст.$	λ_{on}	λ_p
	$h_{10}, м вод. ст.$	$h_{11}, м вод. ст.$											
1													
2													
3													
...													

Контрольные вопросы

1. Виды гидравлических сопротивлений.
2. Уравнение Бернулли. Статистический, геометрический, скоростной напоры.
3. Определение потерь напора на трение.
4. Влияние шероховатости стенок канала на потери напора.

5. Влияние скорости на потери напора.
6. Эквивалентный диаметр.
7. Режимы движения жидкости, число Re.
8. Единицы измерения p , μ , ρ .
9. Уравнение расхода.

Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

Определение коэффициентов местных сопротивлений

Общие положения и цель работы

Наряду с потерями напора на преодоление сил вязкого трения, которые пропорциональны длине канала, поток жидкости теряет свой напор в местных сопротивлениях – запорная и регулирующая арматура (краны, вентили, задвижки), повороты, расширения или сужения трубопроводов. В этих элементах трубопроводных систем происходит изменение скорости напора либо по величине, либо по направлению, либо одновременно по величине и направлению. И потери на трение и потери в местных сопротивлениях, в конечном счете, обусловлены вязкостью жидкости, а следовательно, теряемая механическая энергия рассеивается и переходит в тепловую.

В инженерной практике потери напора h_m (или давления $\Delta P_m = \rho g h_m$) потока в местных сопротивлениях определяют по формуле Вейсбаха

$$h_m = \xi \frac{w^2}{2g}, \text{ м} \quad \text{или} \quad \Delta P_m = \xi \frac{\rho w^2}{2}, \text{ Па}, \quad (1)$$

где w – средняя скорость движения потока, м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение в поле действия силы тяжести, равно 9,81 м/с²; ξ – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициенты различных видов местных сопротивлений находят обычно опытным путем, их средние значения приводятся в справочной и учебной литературе. Для определенного вида местного сопротивления ξ зависит от числа Рейнольдса, если течение ламинарное, и становится постоянной величиной при развитом турбулентном режиме течения.

В формуле (1) скорость может быть принята до или после сопротивления. В зависимости от этого разными будут численные значения коэффициента ξ . Поэтому всегда нужно указывать какая скорость выбрана в

качестве определяющей при вычислении ξ . Чаще используется в качестве определяющей максимальная скорость в местном сопротивлении, отнесенная к минимальному его проходному сечению.

В технических устройствах часто встречаются внезапные расширения и сужения канала. При внезапном расширении, например, напор теряется вследствие удара потока, выходящего с большой скоростью из части трубопровода с меньшим диаметром, в поток, движущийся медленнее в части, где диаметр больше. При этом, в области, примыкающей к прямому углу трубы более широкого сечения, возникают обратные токи – завихрения, на образование которых бесполезно тратится часть энергии потока. Коэффициент местного сопротивления, отнесенный к скорости в меньшем сечении, может быть определен по формулам:

$$\text{для сужения } \xi = 0,5(1 - d^2/D^2); \quad (2)$$

$$\text{для расширения } \xi = (1 - d^2/D^2)^2, \quad (3)$$

где d – диаметр малого сечения канала; D – диаметр большого сечения канала.

Значения коэффициентов ξ для некоторых местных сопротивлений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты местных сопротивлений

Вид местного сопротивления	Коэффициент местного сопротивления
Колено (без закругления) с поворотом потока на 90°	1,1-1,3
Плавное закругление (отвод) на 90° с относительным радиусом $R/d \geq 3$	0,08-0,1
Кран пробковый:	
- при полном открытии;	0,2
- при угле открытия 30-40°	4-11
Вентиль нормальный	4,5-5,5

Цель работы: опытное определение коэффициентов местных сопротивлений расширения и сужения трубы, колена, плавного закругления,

крана, вентиля; сравнение опытных значений ξ с расчетными и табличными данными.

Описание лабораторной установки

Схема установки приведена на рис.4. Из водопровода 1, с регулируемым краном 2 расходом, вода поступает в расходный бак 3. Для

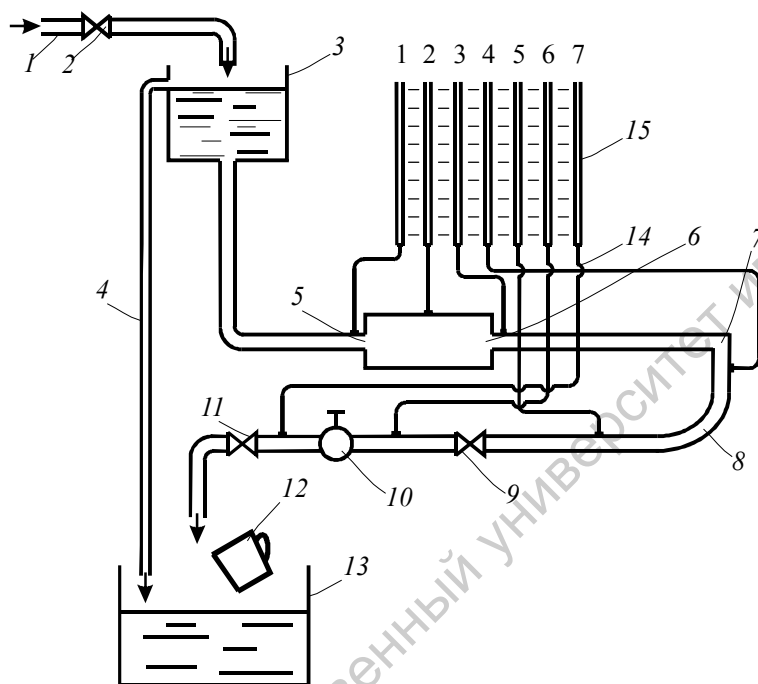


Рис. 4. Схема лабораторной установки для определения коэффициентов местных сопротивлений: 1-водопровод; 2, 9,11-краны; 3-расходный бак; 4-переливная трубка; 5-внезапное расширение; 6-внезапное сужение; 7-колесо; 8-закругленное колесо; 10-вентиль; 12-мерный сосуд; 13-приемный бак; 14-импульсная трубка; 15-пьезометр

10. Расход воды через контур устанавливается краном 11 и измеряется с помощью мерной емкости 12.

Слив воды из контура и переливной трубы осуществляется в приемный бак 13.

Через сверления в стенке контура и трубки 14 подается вода в пьезометры 15 для измерения напора в сечениях потока до и после каждого местного сопротивления. Цифры над пьезометрами на рис. 4 соответствуют их номерам на стенде.

При работе установки должен поддерживаться постоянный уровень воды в расходном баке 3. Это достигается за счет слива по трубе 4 части избыточно подаваемой в бак 3 воды из водопровода 1.

Порядок проведения работы

Открыв кран 2, наполнить водой бак 3 до отверстия слива в переливную трубу. Затем, медленно открывая кран 11, установить расход воды через контур при котором минимальная разность уровней жидкости в каких-либо двух соседних пьезометрах станет равной не менее 2-5 мм вод. ст. Проверить, что идет слив воды через переливную трубу 4. При необходимости увеличить подачу воды из водопровода больше открыть кран 2. При установившемся режиме измерить уровни жидкости в пьезометрах, расход воды с помощью мерной емкости 12 и температуру воды термометром (в приемном баке 13). Занести результаты измерений в таблицу 2.

Далее, последовательно увеличивая расход через контур открытием крана 11, аналогичным образом проводятся измерения при разных расходах, вплоть до максимально возможного. Всего выполняется от 3-х до 6-ти опытных измерений.

После завершения измерений перекрыть кран 2 на водопроводе.

Обработка опытных данных

Для каждого опытного измерения производятся вычисления в следующем порядке.

1. Расход воды

$$Q = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где V – количество воды, поступившей в мерную емкость, м^3 ; τ – время заполнения мерной емкости, с .

2. Определяющая (минимальная) для местных сопротивлений контура скорость движения воды

$$w = \frac{4Q}{\pi d^2}, \text{ м/с,}$$

где d – внутренний диаметр малой трубы контура, равен 0,017 м.

3. Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{w\rho d}{\mu},$$

где ρ – плотность и μ – динамический коэффициент вязкости воды, берутся из табл. П-1 (приложение) при измеренной температуре.

4. Коэффициент местных сопротивлений:

резкое расширение трубы $\xi_1 = (h_1 - h_2) \frac{2g}{w^2};$

резкое сужение трубы $\xi_2 = (h_3 - h_2) \frac{2g}{w^2};$

колесо без закругления $\xi_3 = (h_4 - h_3) \frac{2g}{w^2};$

колесо с закруглением $\xi_4 = (h_5 - h_4) \frac{2g}{w^2};$

кран пробковый $\xi_5 = (h_6 - h_5) \frac{2g}{w^2};$

вентиль нормальный $\xi_6 = (h_7 - h_6) \frac{2g}{w^2},$

где $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7$ – измеренные уровни воды в пьезометрах с соответствующими номерами на стенде. Размерность h_i – м вод. ст.

Наряду с местными сопротивлениями в контуре проявляется и сопротивление трения. Потеря напора потока, обусловлена трением, в коротком контуре сравнительно мала и для упрощения вычисления коэффициентов ξ здесь не учитывается. Полученные опытные значения коэффициентов ξ заносятся в таблицу 2. Они сравниваются с рассчитанными по формулам (2) и (3) и табличными (табл. 1) значениями. Диаметр D большого сечения канала принимается равным 0,069 м. При различиях

расчетных и опытных значений ξ_i анализируются возможные причины расхождения.

Таблица 2

Результаты измерений и сравнение значений ξ

№ опыта	Показания пьезометров, м вод. ст.							$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$V, \text{ м}^3$	$\tau, \text{ с}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$w, \text{ м/с}$	Re	Опытные значения коэффициента местных сопротивлений					
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7							ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4	ξ_5	ξ_6
1																			
2																			
3																			
4																			
5																			
Расчетные и табличные значения ξ :																			

Контрольные вопросы

1. В какую форму переходит механическая энергия потока, теряемая при движении?
2. Чем обусловлены местные сопротивления?
3. Как вычисляются потери напора на преодоление местных сопротивлений?
4. Как меняются скорость и давление потока при его внезапном расширении?
5. Почему уровень воды в расходном баке должен поддерживаться постоянным при проведении опыта?
6. Какая скорость в местном сопротивлении используется в уравнении Вейсбаха для потери напора потока?
7. Для каких целей измеряется температура жидкости в опытах?
8. Как определяются местные потери напора потока по опытным данным?

Определение коэффициента расхода и построение тарировочной кривой расходомера Вентури

Общие положения и цель работы

Для измерения расхода различных жидкостей широко распространены дроссельные расходомерные устройства, к которым относятся расходомерные диафрагмы, сопла и трубы Вентури. Принцип работы этих приборов основан на искусственном увеличении скорости потока за счет сужения потока и измерений падения напора (давления) на этом сужении.

Расходомер Вентури или, как его еще называют, двухконусный расходомер, представляет собой сужающийся прибор, но сужения потока в нем осуществляется плавно, без создания застойных вихревых зон, как это имеет место в диафрагме.

Отсутствие застойных зон позволяет значительно снизить гидравлические сопротивления при прохождении жидкости через данный прибор, что дает возможность использовать трубу Вентури для измерения очень больших расходов жидкости.

В соответствии со схемой на рис. 5 для сечения I-I и II-II расходомера Вентури (позиция 5), на основании уравнения Бернулли для идеальной жидкости

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g}$$

и уравнения неразрывности

$$w_1 F_1 = w_2 F_2 = Q_T,$$

после несложных преобразований можно получить формулу для теоретического расхода через расходомер

$$Q_T = F_1 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{F_1^2/F_2^2 - 1}} = K\sqrt{\Delta h}, \quad (1)$$

где $K = F_1 \sqrt{\frac{2g}{F_1^2/F_2^2 - 1}}$ - постоянная расходомера, определяется его конструкцией; $\Delta h = \left(Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} \right)$ - потеря напора потока между сечениями I-I (широкое) II-II (суженное); F_1, F_2 и P_1, P_2 - площади поперечного сечения и давления потока в сечениях I-I и II-II соответственно; w_1 и w_2 - скорости потока в сечениях I-I и II-II; Z_1 и Z_2 - высотная координата центров сечений I-I и II-II относительно плоскости отсчета; ρ - плотность жидкости; g - ускорение в поле силы тяжести.

При движении вязкой жидкости расход будет меньше теоретического:

$$Q_o = \mu Q_T,$$

где μ - коэффициент расхода, показывающий во сколько раз действительный расход Q_o меньше теоретического Q_T .

Коэффициент расхода μ для каждого типа сужающего устройства свой, зависит от числа Рейнольдса и определяется опытным путем. При достаточно больших значениях числа Рейнольдса его влияние на μ исчезает и коэффициент расхода становится зависимым только от отношения площадей сужающего устройства и трубопровода.

В данной работе требуется определить значение коэффициентов расхода

$$\mu = \frac{Q_o}{Q_T}. \quad (2)$$

Для этого необходимо определить в опыте действительный расход Q_o и для условий опыта найти по формуле (1) теоретический расход Q_T .

Цель работы: опытное определение коэффициента расхода расходомера Вентури; построение тарировочного графика $Q_o = f(\Delta h)$.

Описание лабораторной установки

Схема установки приведена на рис.5. Вода из водопровода 1, с регулируемым краном 2 расходом, поступает в расходный бак 3. За счет постоянного слива по переливной трубе 4 избыточно подаваемой из водопровода 1 воды, в баке 3 поддерживается неизменный уровень воды.

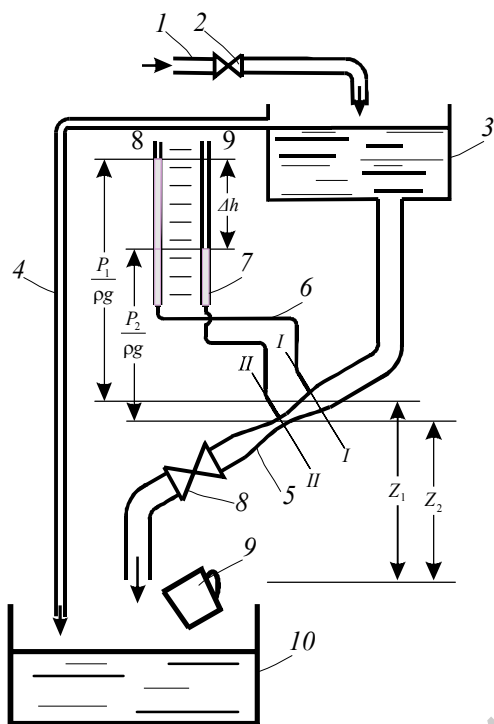


Рис. 5. Схема лабораторной установки для определения коэффициента расхода и построения тарировочной кривой расходомера Вентури: 1-водопровод; 2, 8-краны; 3-расходный бак; 4-переливная труба; 5-расходомер Вентури; 6-импульсная трубка; 7-пьезометр; 9-мерная емкость; 10-приемный бак

постоянного слива по переливной трубе 4 избыточно подаваемой из водопровода 1 воды, в баке 3 поддерживается неизменный уровень воды.

Из расходного бака 3 вода поступает в расходомер Вентури 5. Через сверления в стенке расходомера Вентури 5 в сечениях I-I и II-II по трубкам 6 вода имеет выходы на пьезометры 7, где измеряется напор потока. Цифры возле пьезометров 7 соответствуют их номерам на стенде.

Регулирование расхода потока через расходомер Вентури 5 осуществляется краном 8, а измерение

расхода – с помощью мерной емкости 9.

Выходящие из переливной трубы 4 и расходомера Вентури 5 потоки воды поступают в приемный бак 10.

Порядок проведения работы

Открыв кран 2, заполнить бак 3 водой и убедиться, что часть воды сливается по переливной трубе 4. Открывая кран 8, установить расход воды при котором разность высот столбов воды в пьезометрах составит примерно 10-15 мм вод. ст. Снять показания пьезометров и измерить расход жидкости с помощью мерной емкости 9.

Далее, постепенно открывая кран 8, устанавливать расходы воды (5-6 раз до максимально возможного значения), при которых измерить напоры в пьезометрах и величину расхода. При этом нужно наблюдать за наличием стока из переливной трубы 4 и при необходимости увеличивать подачу воды в расходный бак 3, отрывая кран 2.

Температура воды измеряется термометром в приемном баке 10.

Результаты измерений заносятся в табл.1.

После завершения измерений закрывается кран 2 на водопроводе 1.

Обработка опытных данных

Для каждого опытного измерения производятся вычисления в следующем порядке.

1. Расход воды

$$Q_0 = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где V – количество воды, поступившей в мерную емкость, м^3 ; τ – время заполнения мерной емкости, с .

2. Скорость движения воды в сечении I-I

$$w = \frac{4Q_0}{\pi D^2}, \text{ м/с},$$

где D – диаметр канала в сечении I-I, равен 0,011 м.

3. Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{w\rho D}{\mu},$$

где ρ – плотность и μ – динамический коэффициент вязкости воды, берутся из табл. П-1 при измеренной температуре.

4. Теряемый напор между сечениями I-I и II-II потока

$$\Delta h = h_8 - h_9, \text{ м вод. ст.},$$

где h_8 и h_9 – измеренные уровни в пьезометрах 8 и 9.

5. Теоретический расход (идеальная жидкость)

$$Q_T = K\sqrt{\Delta h}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где постоянная расходомера $K = 0,785D^2 \sqrt{\frac{2g}{D^4/d^4 - 1}}$, равна $2,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{2,5}/\text{с}$; d – диаметр канала в сечении II-II, равен $0,008 \text{ м}$.

6. Коэффициент расхода по формуле (2)

$$\mu = \frac{Q_o}{Q_T}.$$

Результаты расчетов заносятся в табл. 1. На миллиметровой бумаге строятся графики зависимостей, $\mu = f(\text{Re})$ и $Q_o = f(\Delta h)$. Последний график носит название тарировочной кривой расходомера.

Таблица 1

Результаты измерений и расчетов

№ опыта	Показания пьезометров, м вод. ст.		Температура воды t , °C	Объем поступившей воды V , м ³	Время заполнения мерной емкости τ , с	μ , Па·с	ρ , кг/м ³	Q_o , м ³ /с	w , м/с	Re	Δh , м вод. ст.	Q_T , м ³ /с	Коэффициент расхода μ
	h_8	h_9											
1													
2													
3													
...													

Контрольные вопросы

1. Для каких целей служит расходомер Вентури?
2. Принцип действия расходомера Вентури?
3. Какие уравнения лежат в основе работы расходомера?
4. Учитываются ли потери энергии потока при определении Q_T ?
5. Что называется коэффициентом расхода расходомера?
6. Методика определения действительного значения Q_o .

7. Как изменяются скорость и давление при переходе от широкой к узкой части расходомера?
8. Как влияет наклон расходомера на показания пьезометров?
9. Для каких целей уровень воды в напорном баке поддерживается постоянным?
10. От каких факторов зависит постоянная K расходомера?

Приложение

Таблица П-1

Зависимость плотности и вязкости воды от температуры

Температура воды $t, ^\circ\text{C}$	Плотность $\rho, \text{кг/м}^3$	Динамический коэффициент вязкости $\mu \cdot 10^{-4}, \text{Па}\cdot\text{с}$
8	999,88	13,9
10	999,81	13,0
12	999,52	12,4
14	999,27	11,7
16	998,97	11,1
18	998,62	10,6
20	998,23	10,1
22	997,80	9,6
24	997,33	9,1

Список литературы

1. Фролов В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». СПб.: Химиздат, 2003. 608с.
2. Рабинович Е.З. Гидравлика. М.: Недра. 1980. 278с.

Содержание

Введение.....	2
1. Лабораторная работа №1. Определение режимов движения потока.....	4
2. Лабораторная работа №2. Исследование опорожнения сосуда непризматической формы.....	9
3. Лабораторная работа №3. Исследование коэффициента гидравлического трения.....	13
4. Лабораторная работа №4. Определение коэффициентов местных сопротивлений.....	19
5. Лабораторная работа №5. Определение коэффициента расхода и построение тарировочной кривой расходомера Вентури.....	25
Список литературы.....	30