

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева»

Кафедра теплоэнергетики

И. В. Дворовенко

А. Р. Богомолв

ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ ПО ТРУБОПРОВОДАМ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине
«Механика жидкости и газа. Основы теплогазоснабжения и венти-
ляции» для студентов направления подготовки 08.03.01 Строи-
тельство всех форм обучения

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления под-
готовки бакалавров 08.03.01 Строительство в качестве электронно-
го издания для выполнения лабораторной работы студентами для
всех форм обучения

Кемерово 2019

Рецензент:

Темникова Е.Ю. – к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики.

Дворовенко Игорь Викторович, Богомолов Александр Романович. Движение жидкости по трубопроводам различной формы сечения [Электронный ресурс]: методические указания к выполнению лабораторной работы для студентов направления подготовки бакалавров 08.03.01 Строительство всех форм обучения / И.В. Дворовенко, А.Р. Богомолов. – Кемерово: КузГТУ, 2019. – Систем. требования: Pentium IV ; ОЗУ 8 Гб ; Windows XP ; (CD-ROM-дисковод); мышь. - Загл. с экрана.

Методические указания к выполнению лабораторной работы составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Механика жидкости и газа. Основы теплогазоснабжения и вентиляции» и предназначены для студентов направления подготовки бакалавров 08.03.01 Строительство всех форм обучения.

© КузГТУ
Дворовенко И.В.,
Богомолов А.Р.

1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Целью работы является исследование влияния различных факторов на гидравлическое сопротивление прямого гладкого трубопровода при стабилизированном движении в нем однофазной жидкости. Объект исследования – модель реального трубопровода, выполненная на компьютере.

В ходе работы изменяются параметры движения жидкости, размер и форма сечения трубы, длина трубы, температура жидкости, расход. Трубопровод может иметь четыре различных формы сечения: эллипс, прямоугольник, равнобедренный треугольник, кольцевой канал. Рабочей средой является вода. Студенты в ходе выполнения работы задают форму сечения трубопровода, размеры большой и малой осей сечения, длину трубопровода, температуру среды, расход; измеряют давление среды в начальной и конечной точках трубопровода. На основе анализа полученных результатов студенты делают заключение о характере влияния геометрических размеров и формы сечения, свойств жидкости, температуры среды на гидравлическое сопротивление трубопровода.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Гидравлический расчет трубопровода производится для определения потерь давления в нем или для определения геометрических размеров сечения трубопровода при заданном перепаде давления (напоре). Для проведения гидравлического расчета должны быть известны входные параметры потока: скорость движения и температура, и схема трубопровода: площадь и форма сечения, длина прямых участков, местные сопротивления. Под местными сопротивлениями понимают вентили, задвижки, краны и другие конструктивные элементы.

Полное падение давления в трубопроводе (гидравлическое сопротивление) определяется как сумма падения давления за счет трения в прямых участках Δp_T и падения давления в местных сопротивлениях Δp_M :

$$\Delta p = \Sigma \Delta p_T + \Sigma \Delta p_M.$$

В лабораторной работе исследуется движение жидкости в прямом трубопроводе, без изменения направления скорости и размеров сечения, поэтому $\Sigma \Delta p_M = 0$.

Сопротивление прямого участка трубопровода определяется известным выражением Дарси – Вейсбаха:

$$\Delta p_T = \lambda \frac{L \rho w^2}{d}, \quad (1)$$

где λ – безразмерный коэффициент сопротивления трения; L – длина элемента трубопровода, м; d – гидравлический диаметр, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; w – средняя по сечению скорость движения жидкости в трубопроводе, м/с.

Физические свойства жидкости определяются при средней температуре жидкости в трубопроводе.

Гидравлический диаметр трубопровода равен

$$d = \frac{4S}{P}, \quad (2)$$

где S – площадь живого сечения потока, м²; P – смоченный периметр, м.

В лабораторной работе жидкость полностью заполняет сечение трубы, поэтому площадь S равна полной площади сечения трубы, а периметр P равен периметру трубы.

Коэффициент сопротивления трения λ гладкой круглой трубы зависит только от числа Рейнольдса, которое определяют по формуле

$$\text{Re} = \frac{wd\rho}{\mu}, \quad (3)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с.

При изотермическом ламинарном течении в круглой трубе ($\text{Re} < 2300$) коэффициент λ рассчитывается по формуле

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}; \quad (4)$$

при турбулентном течении ($4000 < \text{Re} < 10^{12}$) используется формула А. Д. Альтшуля:

$$\lambda = \frac{1}{(1,82 \cdot \lg \text{Re} - 1,64)^2}; \quad (5)$$

в более узком диапазоне чисел Рейнольдса ($4000 < \text{Re} < 10^5$) можно воспользоваться формулой Блазиуса:

$$\lambda = \frac{1}{(100\text{Re})^{1/4}}. \quad (6)$$

В переходной области течения ($2300 < \text{Re} < 4000$) точных расчетных зависимостей нет. Для определения λ можно воспользоваться данными, приведенными в [1] и в табл. 3 приложения.

Для труб некруглого поперечного сечения коэффициент сопротивления трения λ зависит не только от критерия Рейнольдса, но и от формы этого сечения. Он может быть выражен через коэффициент сопротивления трения трубы круглого сечения с помощью поправочного коэффициента, учитывающего влияние формы поперечного сечения:

$$\lambda = k\lambda_k, \quad (7)$$

где λ_k – коэффициент сопротивления трения трубы круглого сечения при одинаковом числе Re ; k – поправочный множитель, учитывающий влияние формы поперечного сечения трубопровода.

Данные о значениях k для различных форм сечения приведены в [1] и приложении (табл. 4 – 7).

Зависимости плотности и вязкости воды от температуры представлены в приложении (табл. 8).

3. ОПИСАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

Лабораторная работа выполняется на компьютере в среде операционной системы *Windows*. Виртуальная лабораторная установка (рис. 1) состоит из следующих элементов: трубопровода 1, списка рабочих веществ 2, списка видов сечений 3, регуляторов длины большой 4 и малой 5 оси трубопровода, регулятора длины трубопровода 6, регуляторов расхода 7 и температуры среды 8, измерителя расхода 9, датчиков температуры 10, 11 и давления 12, 13. В окне лабораторной работы расположены также схема сечения трубопровода 17, индикатор площади сечения трубопровода 18, индикатор смоченного периметра трубопровода 19, индикатор изменения расхода 20 и индикатор отношения сторон сечения трубопровода 21. Трубопровод прямой, гладкий, течение жидкости стабилизированное изотермическое.

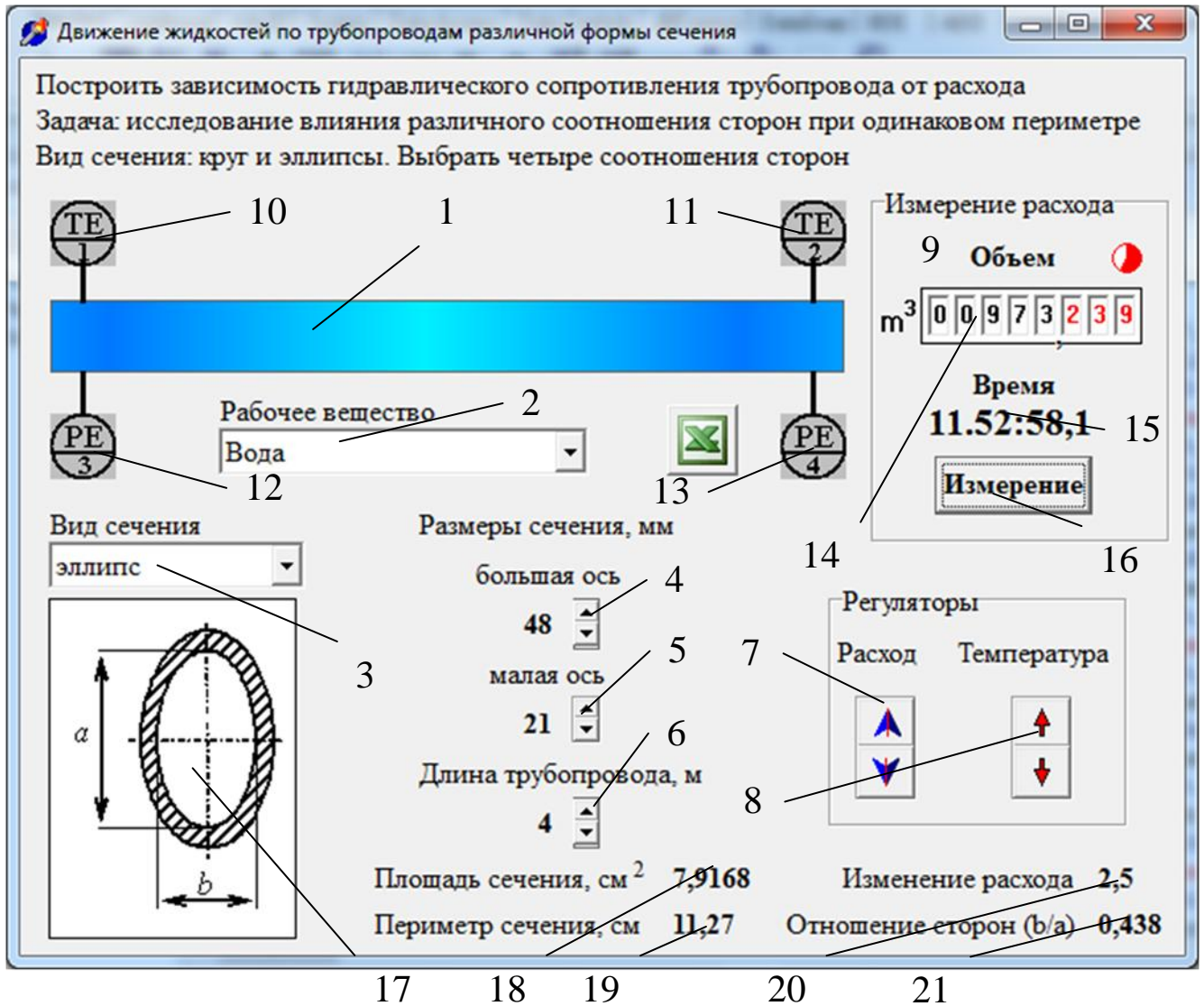


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

1 – трубопровод; 2 – список рабочих веществ; 3 – список видов сечений; 4 – регулятор большой оси трубопровода; 5 – регулятор малой оси трубопровода; 6 – регулятор длины трубопровода; 7 – регулятор расхода; 8 – регулятор температуры; 9 – измеритель расхода; 10, 11 – датчики температуры на входе и выходе трубопровода; 12, 13 – датчики давления на входе и выходе трубопровода; 14 – измеритель объема; 15 – часы; 16 – кнопка "Измерение"; 17 – схема сечения трубопровода; 18 – индикатор отношения осей трубопровода; 19 – индикатор площади сечения трубопровода, 20 – индикатор изменения расхода

Форму сечения трубопровода (прямоугольник, треугольник, эллипс, кольцо (рис. 2)) задают при помощи списка 3 (рис. 1), при выборе сечения в окне 17 изображается схема сечения трубопровода.

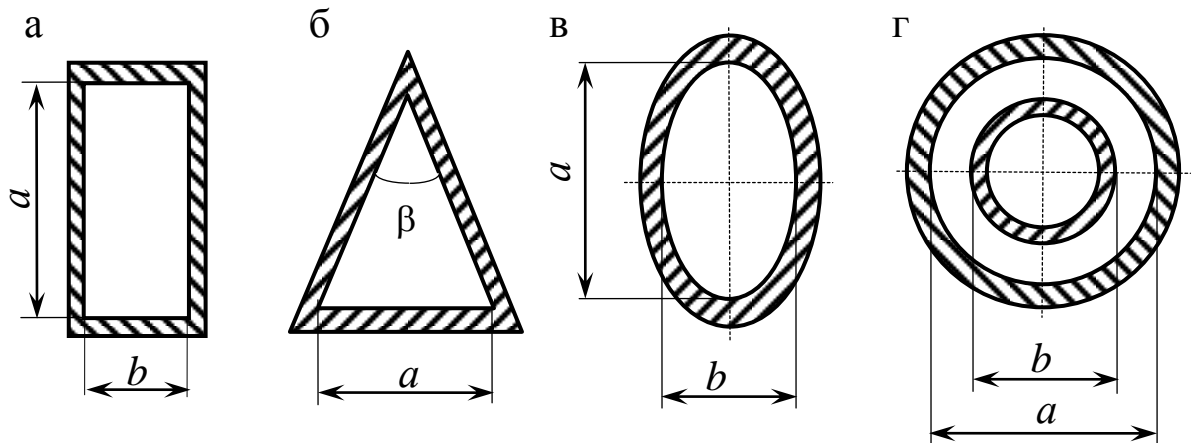


Рис. 2. Виды сечений трубопровода:

а – прямоугольник; б – треугольник; в – эллипс; г – кольцо;
 a , b – линейные размеры; β – угол при вершине

При помощи регуляторов 4 и 5 устанавливаются следующие размеры сечения трубы: для прямоугольника – высота и ширина, для треугольника – основание и угол при вершине, для эллипса – большая и малая оси, для кольца – наружный и внутренний диаметры. При изменении размеров сечения в индикаторе 18 выводится площадь сечения трубопровода, с индикаторе 19 – величина смоченного периметра, а в индикаторе 21 – отношение меньшего и большего размеров сечения. Для увеличения размера нужно установить курсор мыши на верхней кнопке регулятора 4 или 5 и щелкнуть левой клавишей мыши, для уменьшения размера нужно установить курсор мыши на нижней кнопке регулятора. Размер указывается слева от регулятора. Длину труб задают при помощи регулятора 6. Размер указывается слева от регулятора. Рабочее вещество, движущееся в трубопроводе, выбирают из списка 2. Для этого нужно установить курсор мыши на кнопке справа от списка и щелкнуть по левой клавише мыши, затем из раскрывшегося списка выбрать вещество, установив на него курсор мыши и щелкнув по левой клавише. В окне списка появится название выбранного вещества. При помощи регулятора 7 задают расход рабочего вещества в трубе, регулятора 8 – температуру рабочего вещества. Индикатор 20 показывает, во сколько раз изменился расход после последнего измерения.

Для измерения расхода предназначен прибор 9. На приборе расположены измеритель объема рабочего вещества, прошедшего по трубопроводу 14, часы 15 и кнопка "Измерение" 16. Количество

рабочего вещества измеряется с точностью $0,001 \text{ м}^3$, часы измеряют время с точностью $0,1 \text{ с}$. Измерение расхода производится следующим образом: нажимают кнопку 16, индикация объема и времени фиксируется, производят запись объема рабочего вещества и текущего времени, снова нажимают кнопку 16, индикация объема и времени меняется, после определенного промежутка времени снова фиксируют индикацию объема и времени и повторно записывают показания объема рабочего вещества и текущего времени. Расход определяют как отношение разности измеренных объемов к промежутку времени.

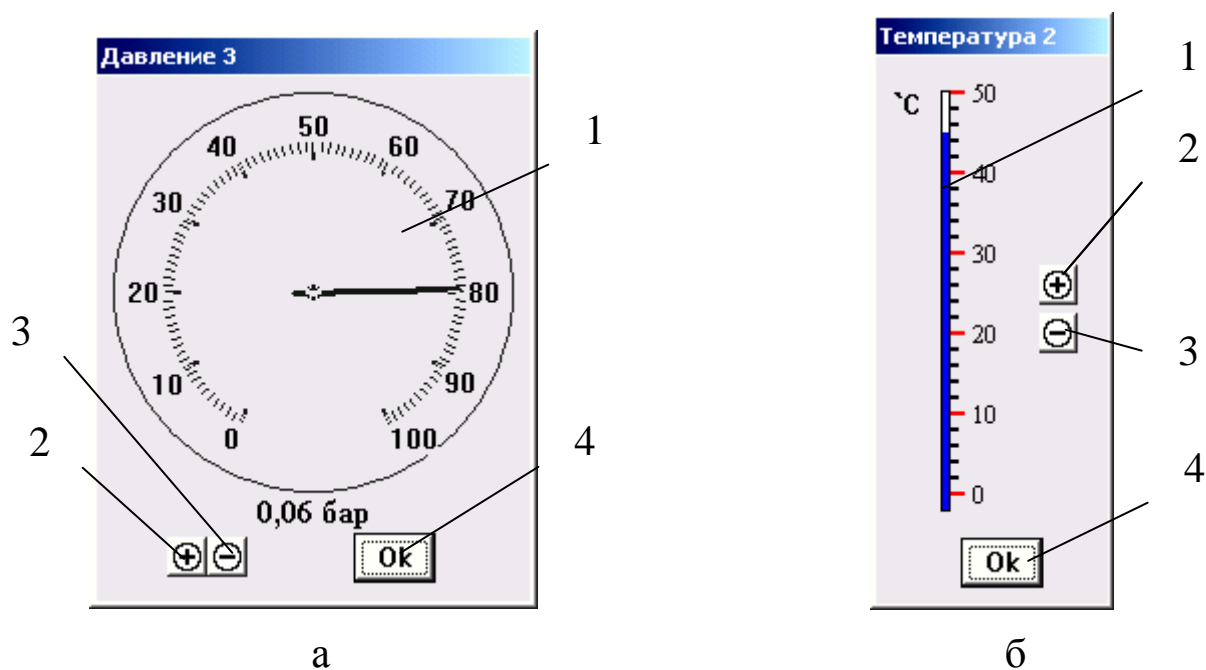


Рис. 3. Панели измерения параметров: а – давления; б – температуры; 1 – шкала прибора; 2 – кнопка увеличения диапазона измерений прибора; 3 – кнопка уменьшения диапазона измерений; 4 – кнопка выключения панели

Температуру рабочего вещества измеряют датчиками 10 и 11. Для определения перепада давления по длине трубы установлены манометры 12 и 13. Потери давления по длине трубопровода рассчитывают по разности показаний приборов. Для измерения параметра в какой-либо точке необходимо поместить курсор мыши на соответствующую пиктограмму (TE или PE) и щелкнуть левой клавишей мыши. На экране открываются дополнительные окна для измерения (рис. 3, а) и температуры (рис. 3, б). В заголовке окна указывается измеряемый параметр и число, соответствующее номеру точки замера на схеме лабораторной установки. Окно (рис. 3,

а) имитирует шкалу стрелочного манометра, на панели окна расположены три кнопки. Кнопка "+" предназначена для увеличения диапазона, но уменьшения точности измерений, "-" – для повышения точности и уменьшения диапазона измерений, "Ок" – для закрытия окна. На шкале манометра указывается наибольшая измеряемая величина и ее размерность. Окно для измерения температуры имитирует термометр расширения, кнопки на панели окна аналогичны описанным выше. Температура измеряется в градусах Цельсия.

4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Перед выполнением работы студент должен знать теоретические положения изучаемого физического явления, изучить устройство лабораторной установки, уметь задавать и определять значения физических величин: температуры, давления, расхода, уметь изменять размеры труб, форму сечения трубы и рабочее вещество, движущееся в трубе. Перед проведением работы подготавливается журнал наблюдений для записи измеряемых величин по образцу табл. 1 приложения.

Работу выполняют в следующей последовательности:

1. Преподаватель ставит задачу исследования с возможным указанием диапазонов изменения основных параметров.
2. Запускают приложение "Гидравлическое сопротивление".
3. Выбирают рабочее вещество из списка 2.
4. Выбирают форму сечения трубы 1 из списка 3 и задают размеры сечения регуляторами 4 и 5.
5. Устанавливают длину трубопровода регулятором 6.
6. Задают температуру рабочего вещества регулятором 8.
7. Задают расход регулятором 7 и определяют значение расхода прибором 9.
8. В журнал наблюдений записывают информацию о рабочем веществе, форме и размерах сечения трубопровода, длине трубопровода, показаниях приборов 9 – 13.
9. Пункты 3 – 8 повторяют нужное количество раз.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Определить плотность ρ и вязкость μ жидкости при температуре рабочего вещества по табл. 8 приложения.

2. Рассчитать объемный расход по формуле

$$V = \frac{W_2 - W_1}{\tau_2 - \tau_1}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где W_1 и W_2 – объемы рабочего вещества в первом и втором замере, м^3 ; τ_1, τ_2 – время первого и второго замера соответственно, с.

3. Рассчитать массовый расход G и среднюю скорость движения жидкости w .

4. Рассчитать гидравлический диаметр трубопровода d по формуле (2), число Re по формуле (3), по табл. 4 – 7 приложения найти фактор формы k , по формулам (4)-(7) или таблицам [1] определить коэффициент сопротивления трения λ .

5. Определить перепад давления Δp_0 в трубопроводе по показаниям манометров, рассчитать перепад давления Δp_T по формуле (1).

6. Сравнить значения Δp_0 и Δp_T по формулам:
расхождение

$$\Delta = |\Delta p_0 - \Delta p_T|, \text{ Па};$$

относительное отклонение

$$\delta = \frac{\Delta}{\Delta p_0}, \text{ \%}.$$

7. Результаты расчетов занести в таблицу, аналогичную табл. 2 приложения.

8. Построить графики зависимостей перепада давления от различных параметров согласно задаче исследования.

9. Провести анализ полученных результатов.

6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет оформляется на листах бумаги формата А4 в соответствии со стандартами. Отчет должен содержать:

- а) титульный лист установленной формы;
- б) краткое изложение теоретических положений;
- в) принципиальную схему установки;
- г) таблицы "Журнал наблюдений" и "Результаты расчета";
- д) графики изменения параметров;

е) анализ результатов работы.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Методика измерения перепада давления в трубопроводе.
2. Какие свойства жидкости, движущейся в трубе, влияют на перепад давления?
3. Как рассчитать перепад давления по длине трубы?
4. Что такое коэффициент сопротивления трения? От чего он зависит?
5. Что такое фактор формы? Какие параметры влияют на него?
6. Как влияет изменение температуры жидкости на гидравлическое сопротивление трубопровода?
7. Как влияет форма сечения трубопровода на коэффициент гидравлического сопротивления?
8. Как влияет вибрация трубопровода на гидравлическое сопротивление?
9. Как влияют коррозия трубопровода и отложения на стенках на гидравлическое сопротивление?
10. Предложите способ уменьшения гидравлического сопротивления трубопровода при неизменной скорости жидкости и диаметре трубы.
11. Выразите число Re через расход.
12. Каковы показатели степени при средней скорости в формуле для определения потерь напора по длине в различных областях сопротивления?
13. Как определить требуемую мощность перекачивающего устройства для перемещения потока жидкости по трубопроводу?

8. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим расчетам. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1975. – 559 с.
2. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – Москва : Альянс , 2005 – 576 с.

Приложение

Таблица 1

ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ

№ П/П	Рабочее вещество	Температура t , °С	Форма сечения трубы	Длина трубы L , м	Размер сечения			Давление						Расход	
					Линейный размер a , мм	Линейный размер b , мм	Угол β , °	Левый манометр			Правый манометр			Первый замер	
Единица измерения	Максимальное давление	Показания манометра, дел.	Единица измерения	Максимальное давление				Показания манометра, дел.	Время τ_1	Объем W_1 , м ³	Время τ_2	Объем W_2 , м ³			

Таблица 2

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

$\frac{N}{P}$	Рабочее вещество	
	Плотность ρ , кг/м ³	Динамическая вязкость μ , Па·с
Смоченный периметр трубопровода, м		
Площадь сечения трубопровода, м ²		
Объемный расход V , м ³ /с		
Массовый расход G , кг/с		
Скорость движения жидкости w , м/с		
Гидравлический диаметр d , м		
Критерий Re		
Коэффициент сопротивления трения λ		
Фактор формы k_H		
Измеренный Δp_0		Перепад давления, кПа
Расчитанный Δp_T		
Расхождение Δ , кПа		
Относительное отклонение δ , %		

Таблица 3

Значение линейного коэффициента сопротивления трения в переходной области ($2000 < Re < 4000$)

Re	2000	2100	2200	2400	2700	3000	3400	3700	4000
λ	0,032	0,035	0,035	0,037	0,038	0,040	0,0415	0,041	0,040

Таблица 4

Значение фактора формы для прямоугольного сечения

Ламинарный режим ($Re \leq 2300$)								
b/a	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	
k	1,50	1,34	1,20	1,02	0,94	0,90	0,89	
Турбулентный режим ($Re > 2300$)								
k	1,10	1,08	1,06	1,04	1,02	1,01	1,0	

Таблица 5

Значение фактора формы для треугольного сечения

Ламинарный режим ($Re \leq 2300$)								
β	1	20	40	60	80	120	160	179
k_H	0,75	0,81	0,82	0,83	0,82	0,80	0,75	0,75
Турбулентный режим ($Re > 2300$)								
k_H	0,75	0,84	0,89	0,93	0,96	0,98	0,99	1,0

Таблица 6

Значение фактора формы для эллиптического сечения

Ламинарный режим ($Re \leq 2300$)										
b/a	0,01	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,99
k_H	1,21	1,16	1,11	1,08	1,05	1,03	1,02	1,01	1,01	1,0
Турбулентный режим ($Re > 2300$) $k = 1$										

Таблица 7

Значение фактора формы для кольцевого сечения

Ламинарный режим ($Re \leq 2300$)										
b/a	0,01	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,99
k_H	1,0	1,40	1,45	1,47	1,48	1,48	1,49	1,49	1,49	1,50
Турбулентный режим ($Re > 2300$)										
k_H	1,0	1,02	1,03	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,06	1,06

Таблица 8

Плотность и динамическая вязкость воды
при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мкПа}\cdot\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мкПа}\cdot\text{с}$
0	999,8	100	958,1	0	1792	100	282,1
5	1000,0	110	950,7	5	1521	110	254,9
10	999,7	120	942,9	10	1308	120	232,1
20	998,3	130	934,6	20	1003	130	212,7
30	995,7	140	925,8	30	797,7	140	196,1
40	992,3	150	916,8	40	653,1	150	181,9
50	988,0	160	907,3	50	547,0	160	169,6
60	983,2	170	897,3	60	466,8	170	158,8
70	977,7	180	886,9	70	404,4	180	149,4
80	971,6	190	876,0	80	354,9	190	141,0
90	965,2	200	864,7	90	314,9	200	133,6