

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ

Директор

_____ О.Ю. Долматов

« ___ » _____ 2015 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТРУБОПРОВОДА

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Процессы и аппараты химических производств» для студентов III курса, обучающихся по специальности 240501 Химическая технология материалов современной энергетики

Составитель: **А.С. Кантаев, Ф.А. Ворошилов, И.Д. Брус**

Издательство

Томского политехнического университета

2015

УДК 66.026.2
ББК Л1/7 35

Определение гидравлических сопротивлений трубопровода:
методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу
«Процессы и аппараты химических производств» для студентов III кур-
са, обучающихся по специальности 240501 Химическая технология ма-
териалов современной энергетики / сост. Кангаев А.С., Вороши-
лов Ф.А., Брус И.Д.; Томский политехнический университет. – Томск:
Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 13 с.

УДК 66.026.2
ББК Л1/7 35

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к из-
данию методическим семинаром кафедры химической техно-
логии редких, рассеянных и радиоактивных элементов (№43)
ФТИ «__» _____ 20__ г.

Зав. кафедрой ХТРЭ,
доктор химических наук, доцент _____ *Р.И. Крайденко*

Председатель
учебно-методической комиссии _____

© Составление. ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2015
© Кангаев А.С., Ворошилов Ф.А., Брус И.Д.
составление, 2015

Цель работы

1. Изучение теоретических основ определения гидравлических сопротивлений в трубопроводах.
2. Определить экспериментально коэффициент трения прямого участка трубы.
3. Определить экспериментально значения коэффициентов местных сопротивлений.
4. Сравнить экспериментальные значения коэффициентов сопротивлений с расчетными и табличными.
5. Построить зависимость сопротивления сети от средней скорости потока.

Теоретическая часть

Расчет гидравлического сопротивления при движении реальных жидкостей по трубопроводам – один из основных прикладных вопросов гидродинамики.

Важность определения потери напора $h_{\text{п}}$ связана с необходимостью расчета затрат энергии, требуемых для компенсации этих потерь и перемещения жидкостей, например, с помощью насосов, компрессоров и т. д.

Потери напора в трубопроводе в общем случае обуславливаются сопротивлением трения и местным сопротивлением.

Сопротивление трения, называемое также *сопротивлением по длине*, существует при движении реальной жидкости по всей длине трубопровода. На него оказывает влияние режим течения жидкости (ламинарный, турбулентный).

Местные сопротивления возникают при любых изменениях значения скорости потока или ее направления. К их числу относятся вход потока в трубу и выход из нее жидкости, внезапные сужения и расширения труб, отводы, колена, тройники, запорные и регулирующие устройства (краны, вентили, задвижки) и др. (см. рис. 1 и рис. 2).

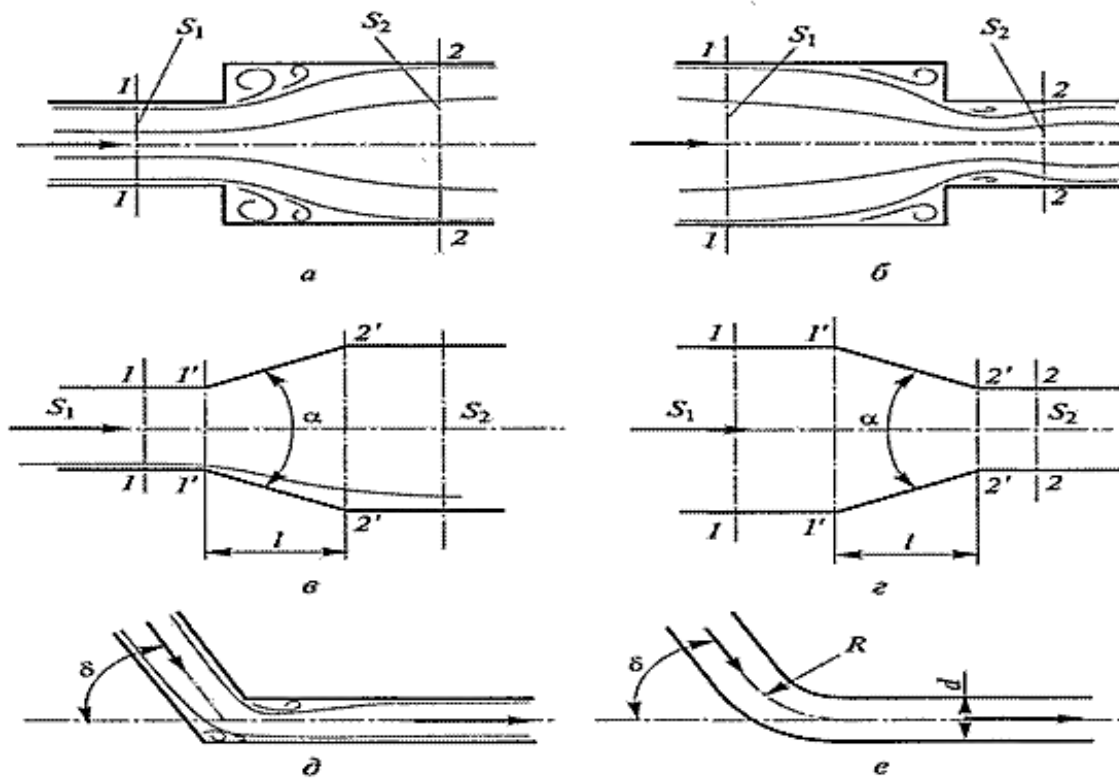


Рисунок 1 – Некоторые местные сопротивления:

а – внезапное расширение; б - внезапное сужение; в – плавное расширение;
 г – плавное сужение; д – поворот трубы без закругления; е – поворот трубы с закруглением

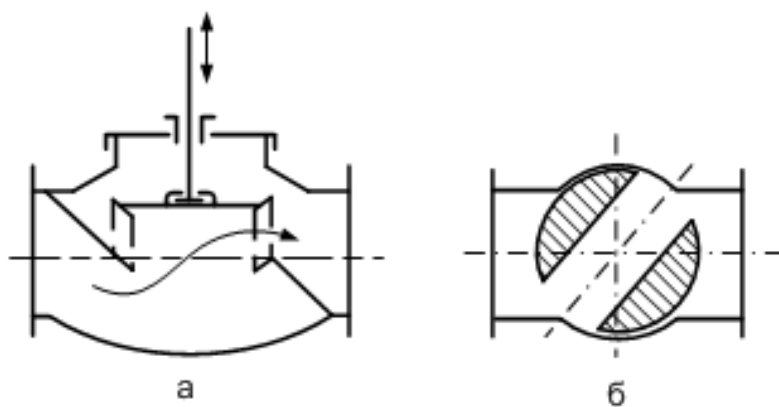


Рисунок 2 – Некоторые запорно-регулирующие устройства:

а – стандартный вентиль; б – пробковый кран

Таким образом, потерянный напор является суммой двух слагаемых:

$$\Delta h_{\Pi} = \Delta h_{\text{тр}} + \Delta h_{\text{м.с.}} \quad (1)$$

где $\Delta h_{\text{тр}}$ и $\Delta h_{\text{м.с.}}$ – потери напора вследствие трения и местных сопротивлений соответственно.

Определение потерь напора проводится на основе решения уравнения Бернулли, которое для двух сечений потока реальной жидкости имеет вид:

$$\frac{\omega_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + z_1 = \frac{\omega_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \Delta h_{\Pi} \quad (2)$$

где: ω_i – средняя скорость жидкости в i -том сечении трубопровода, м/с,
 P_i – давление жидкости в i -том сечении, н/м²,
 ρ – плотность жидкости, кг/м³,
 z_i – нивелирная высота (расстояние до данного сечения от какого-нибудь, принятого за нулевой, уровня, м,
 g – ускорение свободного падения, м/с²,
 Δh_{Π} – потери напора между двумя сечениями, м.

После необходимых замен и сокращений, потерянный напор:

$$h_{\text{тр}} = \frac{64}{Re} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2g} \quad (3)$$

т. е. потерянный на трение напор выражается через скоростной напор $h_{\text{ск}} = \frac{\omega^2}{2g}$.

Величину, показывающую, во сколько раз напор, потерянный на трение, отличается от скоростного напора, называют *коэффициентом сопротивления трения*, и обозначают символом $\zeta_{\text{тр}}$, а отношение $64/Re$, входящее в эту величину, – *коэффициентом гидравлического трения*, или просто *коэффициентом трения*, и обозначают через λ . Поэтому

$$\zeta_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \quad (4)$$

и при ламинарном движении потока ($Re < 2300$)

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (5)$$

при турбулентном движении потока в гладких трубах ($Re > 10000$)

$$\lambda = 0,316 Re^{-0.25} = \frac{0.316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (6)$$

Потери напора в местных сопротивлениях, как и потеря напора на трение, выражаются через скоростной напор. Отношение потери напора

в данном местном сопротивлении $h_{\text{м.с.}}$ к скоростному напору называют *коэффициентом местного сопротивления*, и обозначают через $\zeta_{\text{м.с.}}$. следовательно, для различных местных сопротивлений трубопровода

$$h_{\text{м.с.}} = \Sigma \zeta_{\text{м.с.}} \cdot \frac{\omega^2}{2g} \quad (7)$$

С учетом выражений (3), (4) и (7) расчетное уравнение для определения общей потери напора может быть представлено в виде

$$\Delta h_{\text{п}} = \zeta_{\text{тр}} \cdot \frac{\omega^2}{2g} + \Sigma \zeta_{\text{м.с.}} \cdot \frac{\omega^2}{2g} \quad (8)$$

Коэффициенты местных сопротивлений определяются лишь экспериментально. Величина коэффициента местного сопротивления зависит и от соотношения большего и меньшего диаметров труб при внезапном расширении, сужении и т.д. Сопротивление кранов, вентилях и другой запорной арматуры зависит от их конструкции и степени закрытия.

Экспериментальная часть

Описание установки

Схема установки приведена на рисунке 3. Из водопровода вода поступает в трубопровод 1, в котором последовательно проходит сопротивления трения (участок VI-VII) и местные сопротивления: внезапное расширение трубы (участок I-II), внезапное сужение (участок III-IV), закругление трубопровода (участок IV-V), колено (участок VII-VIII).

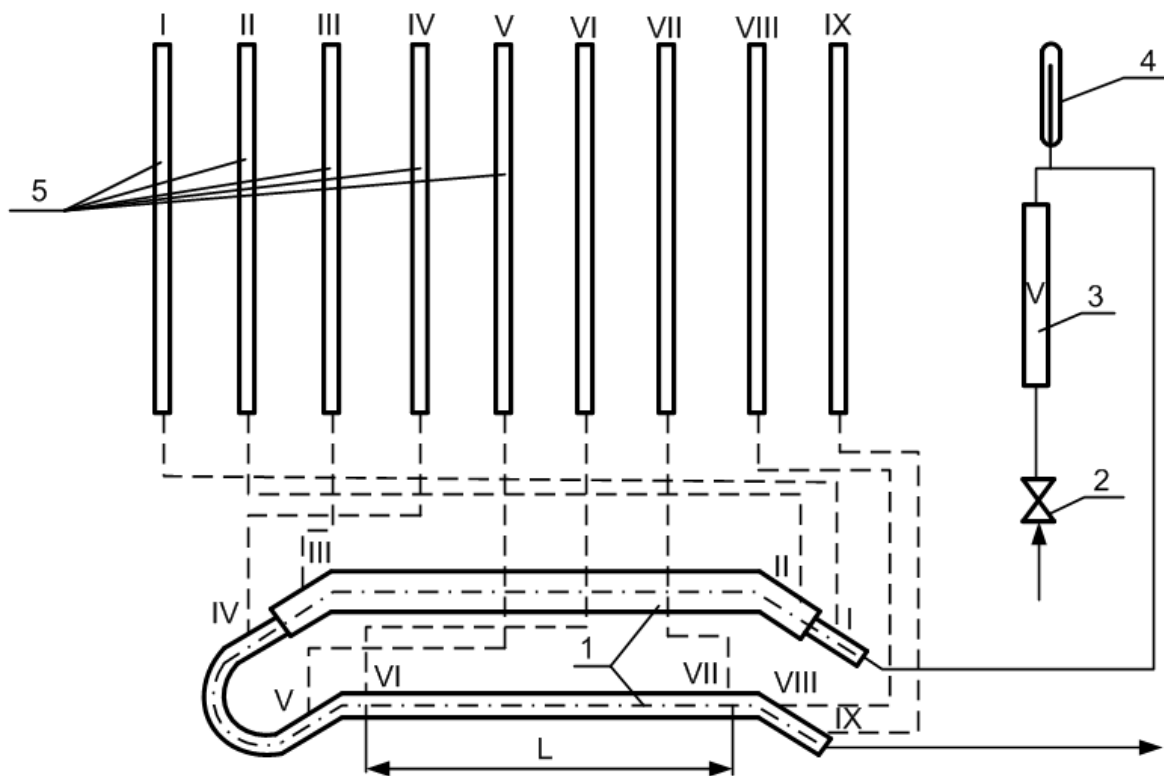


Рисунок 3 – Схема лабораторной установки:

1 – трубопровод, 2 – вентиль, 3 – ротаметр, 4 – термометр, 5 – пьезометр

Расход воды (скорости) осуществляется вентилем 2 и измеряется с помощью ротаметра 3. Градуировочный график ротаметра представлен на рисунке 4.

По трубкам вода подается в пьезометры 5 (открытые сверху стеклянные трубки, помещенные на измерительную шкалу и соединенные нижним концом с той областью, где требуется измерить давление).

Размеры трубопровода:

внутренний диаметр трубы $d=21$ мм,

внутренний диаметр трубопровода $D=49$ мм,

длина гидродинамически стабилизированного участка (VI-VII) $L=600$ мм.

Ход работы

Приоткрыв вентиль 2 (показания ротаметра 40-50 делений по верхней кромке поплавка), заполняют трубопровод водой, вытесняя из него воздух. По прекращению прохождения пузырьков воздуха в пьезометрических трубках, понижают расход до 30 делений шкалы ротаметра и записывают показания пьезометров в таблицу наблюдений (таблица 1).

Таблица 1

Результаты снятых показаний

№ п/п	Показания ротаметра (деления)	Расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$	Показания пьезометров									
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	

Увеличив расход на 3-6 делений шкалы ротаметра, вновь снимают показания пьезометров и т.д. до достижения максимального расхода. Постоянство расхода воды поддерживают очень плавной регулировкой вентиля. В случае образования в процессе испытания воздушных пузырей на участке трубопровода большего диаметра (показания второго и третьего пьезометров значительно отличаются от первого) следует избавиться от них путем увеличения расхода воды и затем вновь настроить установку на необходимый расход воды.

Учитывая большую инерционность установки, показания пьезометров (особенно при больших расходах воды) следует снимать оперативно.

Обработка экспериментальных данных

Пьезометрический напор (высота поднятия жидкости в пьезометре) – мера давления, действующего в месте присоединения к трубопроводу и определяется

$$h = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g}. \quad (9)$$

Согласно уравнению (1), первое слагаемое есть разность пьезометрических напоров, определяемой экспериментально ($\Delta h_{\text{набл}}$).

Для внезапного расширения:

$$\Delta h_{\text{набл}} = h_I - h_{II}. \quad (10)$$

Второе слагаемое в уравнении (1) – разность динамических напоров ($\Delta h_{\text{дин}}$). Таким образом, уравнение (1) для горизонтального участка трубопровода может быть представлено в виде

$$\Delta h_{\Pi} = \Delta h_{\text{набл}} + \Delta h_{\text{дин}}. \quad (11)$$

Так как $\Delta h_{\text{дин}} = 0$, т.е. скорость на участке VI-VII остается постоянной, то

$$\Delta h_{\Pi} = \Delta h_{\text{тр}} = \Delta h_{\text{набл}}. \quad (12)$$

Используя формулы (3), (4) и (5), выразим коэффициент трения λ

$$\lambda = \Delta h_{\text{тр}} \cdot \frac{d \cdot 2g}{L \cdot \omega^2}. \quad (13)$$

По уравнению расхода средняя скорость равна

$$W = \frac{V}{F}, \quad (14)$$

где: V – объемный расход жидкости, т.е. объем жидкости, проходящей через живое сечение потока F (м^2) за единицу времени (с), $\text{м}^3/\text{с}$.

Расчетное значение коэффициента трения определяется по формулам (5) и (6), где критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega \cdot d \cdot \rho}{\mu}, \quad (15)$$

где: ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$,

μ – динамический коэффициент вязкости жидкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Находится относительная погрешность (в %):

$$\delta = \frac{|\lambda_{\text{расчет}} - \lambda_{\text{экспер}}|}{\lambda_{\text{расчет}}} \cdot 100\%, \quad (16)$$

Коэффициент местного сопротивления выражается из уравнения (7):

$$\zeta_{\text{м.с.}} = h_{\text{м.с.}} \cdot \frac{2g}{\omega^2}, \quad (17)$$

На участке закругления трубопровода и колена потеря напора

$$\Delta h_{\Pi} = \Delta h_{\text{м.с.}} = \Delta h_{\text{набл.}}. \quad (18)$$

На участке внезапного расширения или внезапного сужения, необходимо учитывать изменение динамического напора, т.к. в первом случае происходит переход динамического напора в статический, во втором – статического в динамический.

Для участка с внезапным расширением:

$$\Delta h_{\text{м.с.}} = \Delta h_{\text{набл.}} + \Delta h_{\text{дин.}}. \quad (19)$$

Для участка с внезапным сужением:

$$\Delta h_{\text{м.с.}} = \Delta h_{\text{набл.}} - \Delta h_{\text{дин.}}. \quad (20)$$

Разность динамических напоров находится по формуле:

$$\Delta h_{\text{дин.}} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2g}, \text{ м} \quad (21)$$

Где ω_1, ω_2 – скорости движения жидкости соответственно в узком и широком сечениях трубопровода, м/с.

При расчете коэффициента местного сопротивления расширения и сужения скорость берется в меньшем сечении потока.

Плотность и вязкость воды берутся при средней температуре за время опыта. Данные расчетов заносятся в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты расчетов

№ п/п	Виды сопротивлений	Потери напора, м	Коэффициент сопротивления		Коэффициент трения	
			экспер.	таблич.	экспер.	таблич.
1	Внезапное расширение					
2	Внезапное сужение					
3	Закругление трубопровода					
4	Колено					
5	Прямолинейный участок					

Рассчитывается отклонение экспериментально определенных значений коэффициентов местных сопротивлений от табличных значений (таблица 3).

Таблица 3

Значения коэффициентов местных сопротивлений

Виды сопротивлений	Пределы
Внезапное расширение	0,5
Внезапное сужение	0,85
Закругление трубопровода	0,13 ÷ 0,16
Колено	0,04 ÷ 0,06

Характеристикой трубопровода называется графическая зависимость общей потери напора $\Delta h_{\text{общ}}$ в трубопроводе от объемного расхода жидкости (V)

$$\Delta h_{\text{общ}} = \Delta h_{\text{дин.}} + \Delta h_{\text{тр}} + \Delta h_{\text{м.с.1}} + \Delta h_{\text{м.с.2}} + \Delta h_{\text{м.с.3}} + \Delta h_{\text{м.с.4}}$$

Величина общей потери напора может быть также определена, как разность между первым и девятым пьезометром. $\Delta h_{\text{общ}} = h_I - h_{IX}$. Построить график зависимости $\Delta h_{\text{общ}} = f(V)$, рассчитав $\Delta h_{\text{общ}}$ двумя способами. В выводе объяснить полученное различие характеристик трубопровода.

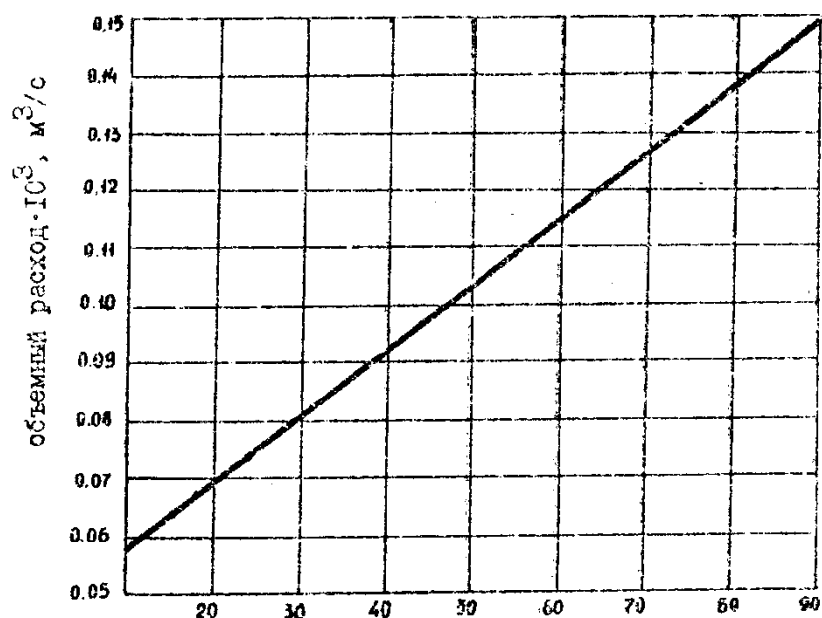


Рисунок 4 – Градуировочный график ротаметра

Контрольные вопросы

1. Виды гидравлических сопротивлений.
2. Уравнение Бернулли.
3. Определение потерь напора на трение и местные сопротивления.
4. Зависимость коэффициента трения от критерия Рейнольдса.
5. Пьезометр и пьезометрический напор.

Учебное издание

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТРУБОПРОВОДА

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Оборудование производств редких элементов» для студентов IV курса, обучающихся по специальности 240501 Химическая технология материалов современной энергетики

Составители

доцент, к.т.н. А.С. Кантаев
доцент, к.т.н. Ф.А. Ворошилов
доцент, к.т.н. И.Д. Брус


**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 01.03.2015. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.
Заказ 1153 Тираж 10 экз.



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru