

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Минцаев Магомед Шавалович  
Должность: Ректор  
Дата подписания: 23.11.2023 13:40:48  
Уникальный программный ключ:  
236bcc35c296f119d6aafdc22836b21db52dbc07971a86885a5825f9a4304cc

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Грозненский государственный нефтяной технический университет  
имени академика М.Д. Миллионщикова**

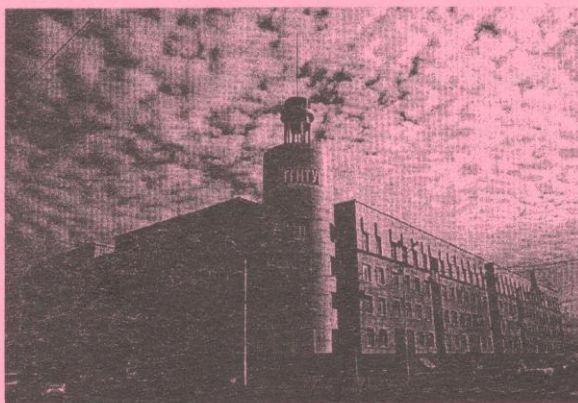


Кафедра «Теплотехника и гидравлика»

**А.Д. Мадаева**

Определение коэффициентов потерь напора на трение в трубах,  
имеющих различную шероховатость

**Методические указания  
к лабораторной работе №3  
по дисциплине «Теплофизика»**



Грозный – 2016

**Составители:**

Мадаева А.Д., ст. преподаватель кафедры «Теплотехника и гидравлика»

(Ф.И.О., должность, ученое звание и ученая степень)

**Рецензент:**

Исаев Х.А., доцент кафедры «Теплотехника и гидравлика»

(Ф.И.О., должность, ученое звание и ученая степень)

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании  
кафедры "Теплотехника и гидравлика"

Протокол № 3 от «1» декабря 2016 г.

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени  
академика М.Д. Миллионщикова, 2016

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОТЕРЬ НАПОРА НА ТРЕНИЕ В ТРУБАХ, ИМЕЮЩИХ РАЗЛИЧНУЮ ШЕРОХОВАТОСТЬ

## 1. Цель работы

Целью работы является определение коэффициентов потерь напора на трение в трубах, имеющих различную шероховатость, а также изучение влияния режима движения на коэффициент потерь напора на трение.

## 2. Общие сведения

Движение газов по прямолинейным участкам труб и каналов всегда сопровождается потерями энергии на преодоление сопротивлений. Величина этих потерь характеризуется коэффициентом потерь напора на трение -  $X$ .

Физика процесса потери энергии определяется режимом движения. При ламинарном режиме потери обусловлены силами внутреннего трения (вязкостью), появляющимися при перемещении одного слоя жидкости или газа относительно другого. Энергия в этом случае тратится на разрыв связей между молекулами. Поскольку силы вязкости пропорциональны скорости потока в первой степени, а изменения скорости по сечению потока значительны, то на преодоление этих сил при ламинарном режиме движения тратится значительно больше энергии, чем на трение о стенки, в силу того, что скорости вблизи стенок оказываются очень маленькими, а пограничный слой имеет толщину большую, чем высота бугорков шероховатости. Поэтому при ламинарном режиме движения шероховатость практически не оказывает влияния на потери энергии потока при его движении по трубам и каналам, а коэффициент потери напора на трение зависит только от числа Рейнольдса :

$$R_e = \frac{WD}{\nu} \quad (1)$$

где  $W$  - средняя по сечению скорость потока в трубе, м/с;

$D$  - определяющий размер (внутренний диаметр трубы), м;

$\nu$  - коэффициент кинематической вязкости (кинематический коэффициент вязкости), м<sup>2</sup>/с.

При увеличении числа Рейнольдса начинают преобладать силы инерции, пропорциональные квадрату скорости. При этом возникает турбулентное движение, характеризующееся появлением поперечных составляющих скорости и связанного с этим перемещением жидкости (газа) в направлении, нормальном к направлению скорости. При турбулентном режиме потери энергии, обусловленные обменом количеством движения беспорядочно движущихся микрообъемов среды (турбулентных вихрей), становятся во много раз больше, чем при ламинарном. Вместе с тем при ламинарном течении значение  $\lambda$  оказывается больше, чем при турбулентном. Это объясняется тем, что коэффициент потерь на трение определяется как отношение потерь давления, пропорциональных первой степени скорости, к скоростному напору, который пропорционален квадрату скорости.

$$\lambda = \frac{\Delta H_{\text{ТР}}}{\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2}} \quad (2)$$

где  $\Delta H_{\text{ТР}}$  - потери давления на участке трубопровода, Па;  $l$  - длина участка трубопровода, м.

В случае шероховатой поверхности стенок пограничный слой становится сопоставим по толщине с размерами бугорков шероховатости. Обтекание выступов при возросшей скорости происходит с отрывом, т.е. с образованием вихрей, и коэффициент потерь начинает зависеть не только от числа Рейнольдса, но и от относительной шероховатости стенки:

$$\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{\rho} \quad (3)$$

где  $\Delta$  - средняя высота выступов шероховатости стенок канала, м.

В турбулентном же режиме обтекание потоком бугорков шероховатости не приводит к увеличению уровня турбулентности потока, поскольку толщина пограничного слоя становится пренебрежимо малой по сравнению с высотой бугорков шероховатости.

Результаты опытов Д. Никурадзе, изучавшего влияние режима движения на коэффициент потерь напора на трение в трубах с равномерной шероховатостью, показаны на рис. 1 в виде графика. На этом графике выделяют три области с различными по характеру зависимостями  $\lambda$  от режима движения. *Первая область* относится к малым значениям чисел  $Re$  (до  $Re = 2000$ ), т. е. к ламинарному режиму движения, и характеризуется тем, что шероховатость не оказывает никакого влияния на коэффициент потерь напора на трение. Зависимость  $\lambda$  от режима движения в этой области чисел Рейнольдса подчиняется закону Гагена-Пуазейля:

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

*Во второй*, так называемой переходной между ламинарным и турбулентным течением области ( $Re = 2000.4000$ ), коэффициент потерь напора на трение сначала быстро растет с увеличением числа Рейнольдса, оставаясь при этом одинаковым для труб с различной шероховатостью, а затем, вследствие усиливающегося влияния относительной шероховатости на коэффициент потерь, кривые для труб с разной шероховатостью начинают расходиться и перестают подчиняться зависимости, полученной Блазиусом для гладких труб:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (5)$$

Таким образом, во второй области на коэффициент потерь влияют и режим движения - ( $Re$ ) и относительная шероховатость - ( $\bar{\Delta}$ ).

Третья область характеризуется развитым турбулентным течением. В ней потери энергии практически перестают зависеть от режима движения и зависят только от относительной шероховатости внутренней поверхности канала.

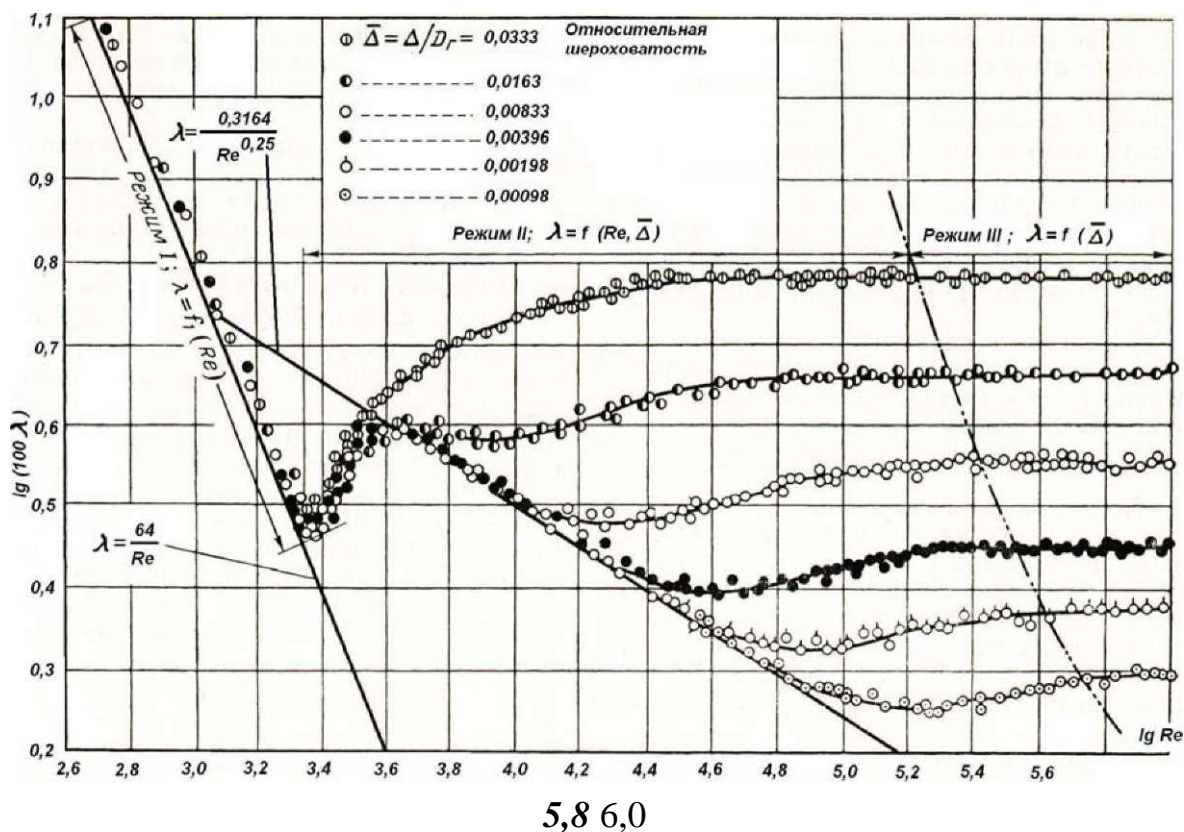


Рис. 1. Зависимость коэффициента потерь на трение  $\lambda$  от  $Re$  для труб с равномерно-зернистой шероховатостью (график Никурадзе)

### 3. Описание лабораторной установки и принцип ее работы

Лабораторная установка для изучения закономерностей движения газов по трубам и каналам показана на рис. 2. Таких установок в лаборатории установлено 3, и ко всем установкам централизованно подведён воздух от одного вентилятора. *(Вентилятор включает только преподаватель.)* На каждой установке работает одна бригада студентов.

Установки сконструированы таким образом, что на каждой из них возможно проведение четырех различных лабораторных работ:

- Лабораторная работа № 1-М - «Исследование движения газовой среды в трубах переменного сечения»;
- Лабораторная работа № 2-М - «Исследование закономерностей свободной затопленной струи»;
- Лабораторная работа № 3-М - «Определение коэффициентов потерь напора на трение в трубах»;
- Лабораторная работа № 4-М - «Определение коэффициентов местных сопротивлений».

Основным элементом установки, на котором исследуют закономерности движения воздуха, является труба 1, имеющая внутренний диаметр 46 мм и два поворота на 90°. К трубе присоединён коллектор 15 с внутренним диаметром 100 мм, соединённый с помощью шаровых кранов 12...14, с тремя трубами 8...10, имеющими внутренний диаметр 21 мм и различную шероховатость внутренней поверхности. Для измерения статического давления на установке предусмотрены пронумерованные штуцеры, соединенные трубками через соответствующий кнопочный кран, имеющий тот же номер что и штуцер, с коллектором 2. Коллектор подключён к датчику давления 3, который при появлении избыточного давления в коллекторе вырабатывает унифицированный токовый сигнал и передаёт его на вторичный прибор измерения давления 17. Вторичный прибор показывает этот сигнал в виде цифр, соответствующих избыточному давлению в коллекторе 2 в кПа.

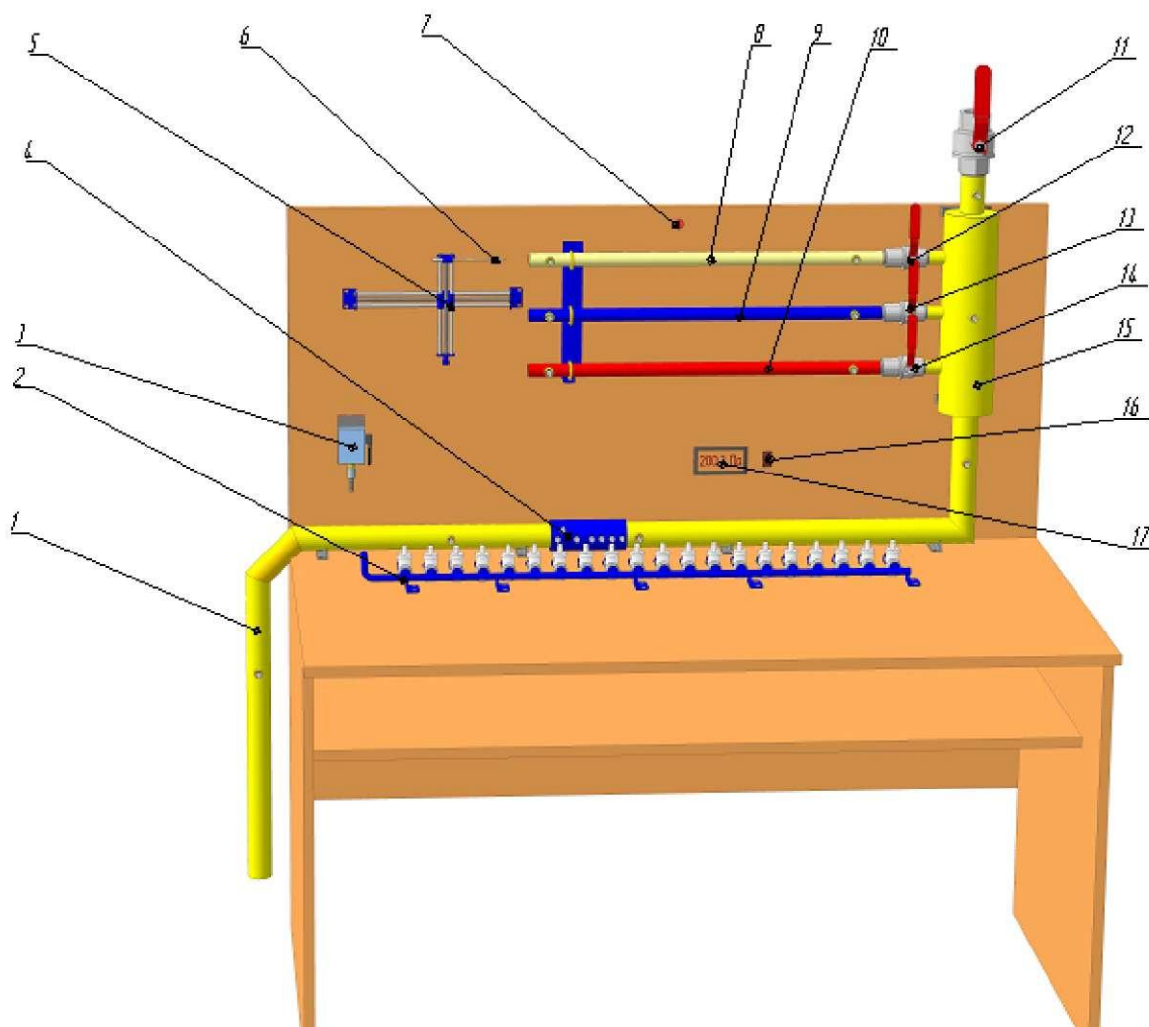


Рис. 2. Лабораторная установка: 1 - воздуховод; 2 - коллектор с кнопочными кранами; 3 - датчик давления; 4 - труба Вентури; 5 - координатник; 6 - измерительная пневмометрическая трубка; 7 - сигнальная лампочка; 8 - гладкая труба внутренним диаметром 20 мм; 9 - труба с абсолютной шероховатостью 0,3 мм; 10 - труба с абсолютной шероховатостью 0,6 мм; 11 - шаровой кран диаметром 40 мм; 12, 13, 14 - шаровые краны диаметром 20 мм; 16 - электрический выключатель; 17 - вторичный прибор измерения давления

Поскольку выполнение любой из четырёх лабораторных работ связано с измерением статического давления в той или иной точке, то студенту при выполнении лабораторной работы остается лишь правильно выбрать точку измерения и произвести нужное измерение.

Для измерения статического давления необходимо подготовить установку и приборы к работе. До того, как преподавателем будет включён вентилятор, нужно подать напряжение на установку, включив электрический выключатель 16. При этом должна загореться сигнальная лампочка 7 и



цифры на вторичном измерительном приборе 17. **Необходимо дать прибору прогреться в течение не менее пяти минут.** Соединить коллектор 2 с атмосферой, нажав любой из кнопочных кранов, и удерживать его в нажатом состоянии 3...5 секунд. При этом вторичный измерительный прибор должен показать нулевое давление. Если прибор показывает иное давление, то следует одновременно нажать две металлические кнопки, расположенные на панели прибора и удерживать их до тех пор, пока прибор не покажет нулевое давление. После этого установка готова к работе, а преподаватель, убедившись в готовности всех установок, может включать вентилятор.

Для измерения давления в выбранной студентом точке необходимо нажать кнопочный кран с соответствующим номером и удерживать его в нажатом состоянии до стабилизации показаний вторичного прибора (примерно 5.15 секунд). При нажатии на любой кнопочный кран происходит соединение соответствующего штуцера с коллектором. При этом статическое давление в месте установки штуцера передаётся в коллектор и воздействует на подключенный к коллектору датчик давления. Датчик давления преобразует полученный импульс в унифицированный токовый сигнал и передаёт его на вторичный прибор измерения давления. После того, как кнопка крана будет отпущена, в коллекторе остаётся давление, которое показывает вторичный прибор, однако при этом установка готова к измерению давления в любой другой точке. **Одновременное нажатие двух кнопочных кранов при замере давления не допускается.**

Для измерения расхода воздуха на установке служит труба Вентури 4 (рис. 1), представляющая собой сужающее устройство. Для того чтобы воспользоваться этим сужающим устройством, достаточно измерить статические давления перед трубой Вентури - точка 3 и в самом узком ее сечении - точке 9. После чего можно рассчитать расход воздуха по уравнению:

$$V_t = 0,00199 \sqrt{\frac{(P_3 - P_9)}{\rho_t}} \quad (6)$$

где  $P_3$  и  $P_9$  - статические давления в точках 3 и 9 соответственно, Па;  $\rho_t$  - плотность воздуха при его температуре  $t$ , ( $^{\circ}\text{C}$ ) и абсолютном давлении  $P$ , (Па) во время проведения измерений, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_0 = 1,293$  кг/м<sup>3</sup>, то при температуре и давлении эксперимента плотность

Поскольку плотность воздуха при нормальных условиях составляет 1,293 кг/м<sup>3</sup>, то при  $t$  определяется по формуле:

$$\rho_t = \rho_0 \frac{P \cdot 273}{101325 \cdot T} \quad (7)$$

#### 4. Порядок проведения работы

Перед началом работы ознакомиться с разделом «Описание лабораторной установки».

Данная работа проводится с использованием труб 8, 9 и 10, имеющих разную шероховатость. Поскольку при неизменном расходе воздуха в трубопроводе постоянного сечения динамический напор, прямо пропорциональный квадрату скорости, остаётся неизменным на всём протяжении участка трубы, то все потери энергии, происходящие в потоке, выражаются через потери потенциальной энергии, т. е. в изменении статического давления по длине трубы. Поэтому вся работа сводится к измерению падения статического давления по длине исследуемой трубы.

Перед началом работы преподаватель может поставить студенту различные задачи, а от студента требуется творчески подойти к выполнению работы и экспериментально решить поставленную задачу.

В общем случае для проведения работы необходимо:

- 3.1.** Подготовить установку к работе, как указано в разделе - «описание лабораторной установки».
- 3.2.** Открыть один из кранов 12, 13 или 14, подающих воздух в исследуемую трубу.
- 3.3.** Установить с помощью открытого крана заданный преподавателем расход воздуха, измеряя перепад давлений на трубе Вентури (см. раздел «описание лабораторной установки»).
- 3.4.** Измерить статическое давление на входе и на выходе соответствующей трубы.
- 3.5.** В соответствии с заданием преподавателя и выбранным методом, провести достаточное количество измерений, необходимых для решения поставленной задачи.
- 3.6.** Все результаты измерений и последующих расчётов записывают в таблицу 1.

## Результаты измерений

Величина		Труба №		
		1	2	3
Расход	Перепад давлений в трубе Вентури $\Delta P_{ст1 \sim ст2}$ , Па			
	$V_t$ , м <sup>3</sup> /с			
Площадь сечения трубы	2 $a$ , м			
Скорость	$W$ , м/с			
Статический напор	Вход $P_m$ , Па			
	Выход $P''_{cn}$ , Па			
Потери статического напора в трубе	$\Delta P = P_{ст} - P_{ст}$ , Па			
Коэффициент потерь напора на трение	$\lambda$			

После завершения всех необходимых измерений приступают к математической обработке полученных результатов.

Расход воздуха определяют по формуле (1), учитывая температуру воздуха и атмосферное давление в помещении лаборатории.

Среднюю скорость потока в трубе (м/с), рассчитывают по формуле

$$W_t = \frac{V_t}{\omega} \quad (8)$$

Величину динамического напора (Па) определяют по формуле

$$P_{дин} = \frac{W_t^2}{2} \cdot \rho_t \quad (9)$$

Значение  $\lambda$  рассчитывают с использованием формулы (2), которая после небольших преобразований примет вид

$$\lambda = \frac{D}{1} \cdot \frac{\Delta P}{P_{\text{дин}}} \quad (10)$$

Если коэффициент потерь напора на трение  $\lambda > 0,03$ , то значение относительной шероховатости можно рассчитать по формуле

$$\bar{\Delta} = \left( \frac{\lambda}{0,11} \right)^4 - \frac{68}{Re} \quad (11)$$

Для того чтобы сопоставить полученные экспериментальные результаты с приведёнными на графике Никурадзе, необходимо определить режим движения потока воздуха в исследуемой трубе, рассчитав число подобия Рейнольдса по формуле (1). Если окажется, что режим движения был ламинарным ( $Re < 2000$ ), то коэффициент потерь напора на трение, определенный по формуле (10), сравнивают со значением  $\lambda$ , рассчитанным по формуле Гагена-Пуазейля (4). Если режим движения переходный (число подобия  $2000 < Re < 4000$ ), то значение  $\lambda$ , полученное экспериментальным путём, сравнивают с рассчитанным по формуле Блазиуса (5). При этом надо иметь в виду, что формула Блазиуса выведена для гладких труб с относительной шероховатостью  $\bar{\Delta} < 0,03$ .

#### 4. Оформление отчёта

В отчёт должны быть включены следующие разделы:

- 4.1. Цель работы.
- 4.2. Схема и описание установки.
- 4.3. Методика исследования, включая расчётные формулы с расшифровкой входящих в них величин.
- 4.4. Таблица результатов измерений и расчётов.
- 4.5. Математическая обработка результатов измерений.
- 4.6. Выводы по проведенной работе.

## 5. Контрольные вопросы

- 5.1. Цель работы.
- 5.2. Что такое коэффициент потерь напора на трение, его физический смысл?
- 5.3. От каких параметров может зависеть величина коэффициента потерь напора на трение?
- 5.4. Какой из напоров теряется при движении потока в трубе? Изменяется ли его величина по длине трубы постоянного сечения? Чем это можно объяснить?
- 5.5. Что такое абсолютная и относительная шероховатость?
- 5.6. Можно ли по характеру изменения величины коэффициента потерь напора на трение судить о режиме движения потока?