

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:

236bcc35c296f119d6aafdc22836b21db52dbc07971a86865a5875f9fa4304cc

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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



Кафедра «Теплотехника и гидравлика»

**А.Д. Мадаева  
М.Х. Магомадова**

**Исследование закономерностей распространения  
свободной затопленной струи**

**Методические указания  
к выполнению лабораторной работы №2 по дисциплине  
«Тепломассообмен»**

(направление подготовки 13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника,  
по профилям -Тепловые электростанции, Энергообеспечение предприятий;  
квалификация - бакалавр)



Грозный - 2017

**Составители:**

ст. преподаватель кафедры «Теплотехника и гидравлика» А.Д.Мадаева  
канд. хим. наук, ст. преподаватель кафедры «Теплотехника и гидравлика»  
М.Х. Магомадова

**Рецензент:**

канд. хим. наук, доцент, зав. каф. «Теплотехника и гидравлика», Р.А. Турлуев

Методическое указание к выполнению лабораторной работы №2 по дисциплине «Тепломассообмен» предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.01 - Теплоэнергетика и теплотехника.

Методическое указание рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Теплотехника и гидравлика»

Протокол №\_\_ от «\_\_» 2017г.

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова», 2017г.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 – М

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВОБОДНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ

#### 1. Цель работы

На лабораторной установке исследовать характер изменения осевой скорости по длине струи; построить график распределения скоростей в поперечном сечении струи, проанализировать полученные результаты и сопоставить их с теоретическими данными.

#### 2. Общие положения

Процесс распространения газовой струи, истекающей из сопла или отверстия в пространство, заполненное газами (окружающей средой), называется *струйным процессом*, а сам истекающий газ и часть вовлеченной им в движение окружающей среды – *струей*.

Струи принято классифицировать по соотношению физических свойств истекающего газа и среды, заполняющей пространство, в котором струя развивается. Если среда неподвижна и ее физические свойства совпадают с физическими свойствами струи, то такая струя называется затопленной. Струю называют свободной в том случае, если она распространяется в неограниченном какими-либо стенками пространстве. При этом статическое давление в струе оказывается равным давлению в окружающей среде, а вся энергия, которую содержал в себе поток перед выходом из сопла, переходит в кинетическую, т. е. в энергию движения струи.

Знание закономерностей развития струй имеет большое прикладное значение для организации факельного сжигания топлива, при продувке жидкого металла газами, при струйном нагреве или охлаждении металла и во многих других технологических процессах черной и цветной металлургии.

Рассмотрим упрощенную схему затопленной свободной струи, одинаково справедливую как для осесимметричной струи, истекающей из круглого сопла, так и для плоской струи, истекающей из щели (рис.4).

При выходе струи из сопла средняя по сечению скорость её движения, по мере удаления от выходного сечения, уменьшается, а площадь поперечного сечения увеличивается. Это объясняется наличием в струе турбулентных вихрей, которые в результате поперечных перемещений отдают окружающей её среде некоторое количество кинетической энергии, заставляя последнюю двигаться не только в направлении распространения струи, но и перемещаться к её центру. Если окружающая среда неподвижна, то в результате описанного энергетического взаимодействия масса струи в направлении её движения возрастает, сечение увеличивается, а скорость на оси струи на некотором удалении от среза сопла начинает убывать.

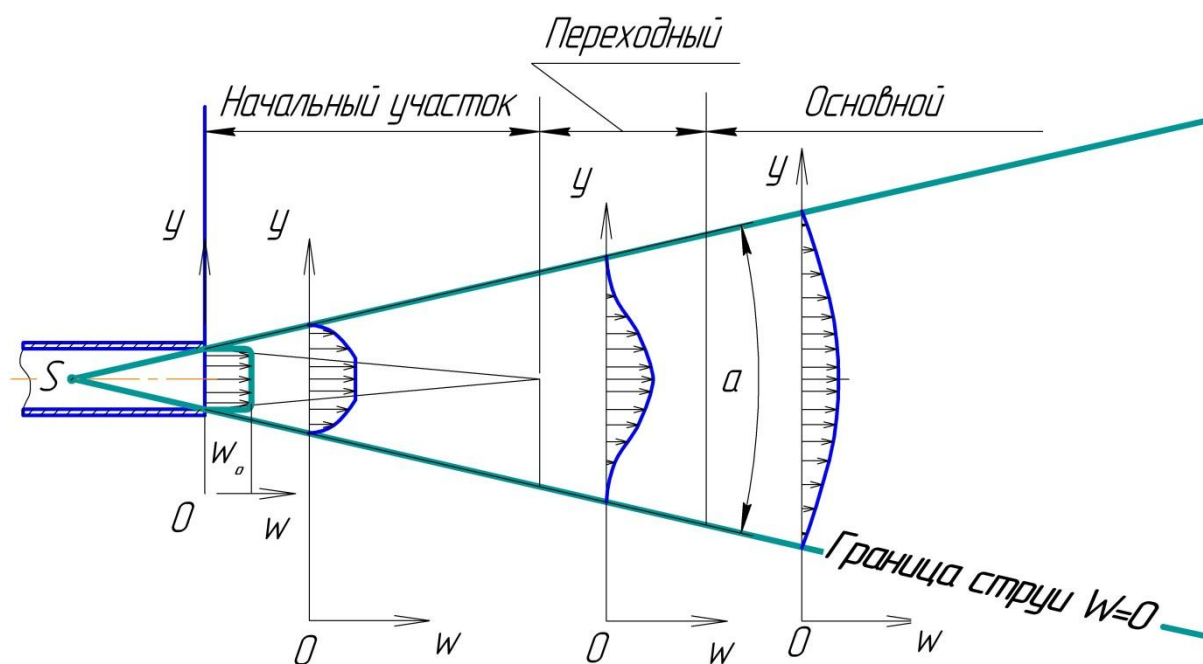


Рис. 4. Схема свободной затопленной струи

Одним из свойств свободной струи является прямолинейность ее границ, поэтому радиус поперечного сечения осесимметричной струи нарастает по длине линейно, т. е.

$$R_x = r_0 + CX, \quad (12)$$

где  $R_x$  – радиус струи в сечении на расстоянии  $X$  от среза сопла;

$r_0$  – радиус сопла;

$C$  – постоянный коэффициент, равный тангенсу угла раскрытия струи.

Следовательно, струя будет представлять собой вытянутый конус, вершина которого (точка  $S$  на рис. 4) располагается внутри сопла. Угол раскрытия свободной струи ( $\alpha^\circ$ ) может изменяться в достаточно широких пределах от  $18$  до  $26^\circ$  в зависимости прежде всего от начальной скорости.

По длине свободной струи условно можно выделить три участка. Первый из них, называемый начальным, простирается на расстояние  $4 \dots 6$  диаметров выходного сопла. На всём его протяжении скорость на оси струи не меняется и численно равна начальной скорости истечения ( $W_0$ ).

Второй участок, называемый переходным, не превышает  $2 \dots 4$  диаметров сопла. Здесь происходит перестройка профиля скорости в поперечном сечении струи, причём осевая скорость начинает уменьшаться.

Самым протяженным является третий участок, называемый основным, длина которого может достигать  $8 \dots 10$  диаметров и более. На этом участке осевая скорость продолжает падать, но при этом профили скоростей в разных сечениях струи становятся подобными и в относительных координатах эпюры скоростей описываются одной общей кривой. Это свойство струи на ее основном участке называется *свойством подобия или автомодельности*.

Скорость на оси струи ( $W_x$ ) в пределах основного участка можно рассчитать по формуле Г.Н. Абрамовича:

$$\frac{W_x}{W_0} = \frac{0,96}{\frac{0,16x}{d_0} + 0,29}. \quad (13)$$

Распределение скоростей в поперечных сечениях основного участка свободной струи описывается уравнением

$$\frac{W_y}{W_x} = \left[ 1 - \left( \frac{y}{R_x} \right)^2 \right]^2, \quad (14)$$

где  $W_y$  – скорость в точке, отстоящей от оси струи на расстоянии  $y$ , м/с.

Изменение расхода в движущейся струе по мере ее удаления от сопла на основном участке можно рассчитать, используя уравнение:

$$\frac{V_x}{V_0} = 2,22 \left( \frac{0,16x}{d_0} + 0,29 \right), \quad (15)$$

где  $V_0$  – расход струи на выходе из сопла, м<sup>3</sup>/с;

$V_x$  – то же в поперечном сечении струи, отстоящем на расстоянии  $X$  от среза сопла м<sup>3</sup>/с.

Характеристики струи определяются полем скоростей и расходов по длине и поперечным сечениям струи, ее границами и углом раскрытия, количеством движения и кинетической энергией. Именно эти параметры определяют характер теплового и механического воздействия струи на окружающую среду и поверхности обрабатываемого материала.

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

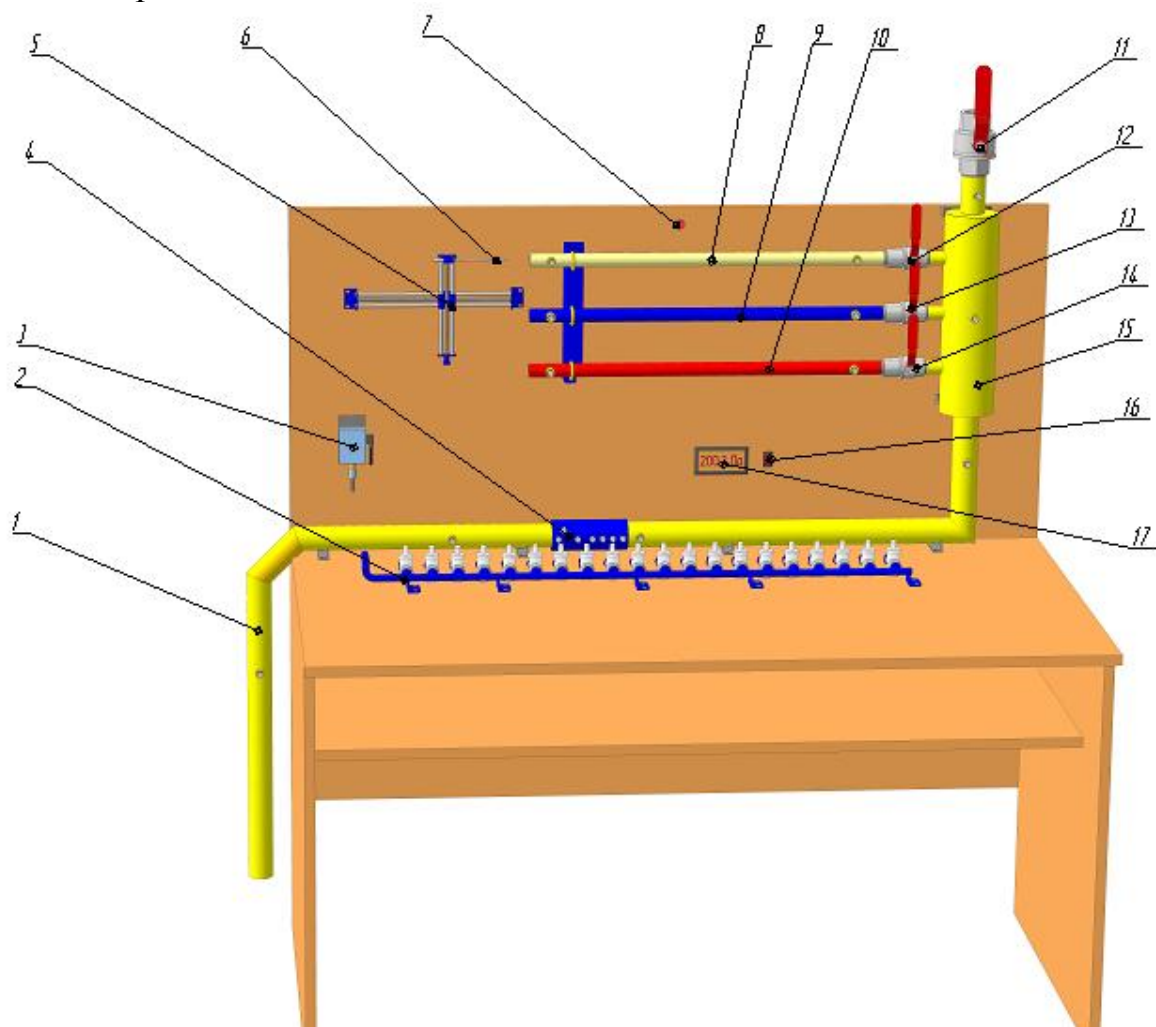
Лабораторная установка для изучения закономерностей движения газов по трубам и каналам показана на рис. 1. Таких установок в лаборатории установлено 3, и ко всем установкам централизованно подведён воздух от одного вентилятора. (*Вентилятор включает только преподаватель.*) На каждой установке работает 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, соединённые 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. 1. 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:

$$V_t = 0,00199 \sqrt{\frac{(P_3 - P_9)}{\rho_t}}, \quad (1)$$

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,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

Поскольку плотность воздуха при нормальных условиях составляет  $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$ , то при температуре и давлении эксперимента плотность определяется по формуле

$$\rho_t = \rho_0 \frac{P \cdot 273}{101325 \cdot T}. \quad (2)$$

Особенности проведения той или иной работы описаны ниже в разделах «порядок проведения работы» для каждой работы отдельно.

#### 4. Порядок проведения работы

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

Порядок проведения работы зависит от задания, полученного студентом от преподавателя, но в любом случае выполнение работы связано с измерением динамического давления в движущейся струе. Это давление измеряют с помощью пневмометрической трубки 6 (см. рис. 1), установленной на координатнике 5, который позволяет перемещать пневмометрическую трубку как вдоль оси струи, так и в вертикальном направлении поперёк. Таким образом, обеспечивается возможность измерения динамического напора, а значит, и скорости струи в любой точке, расположенной на вертикальной плоскости проходящей по оси струи.

Для измерения скоростей в струе необходимо:

**3.1.** Открыть шаровой кран 12 и установить заданный преподавателем расход воздуха  $V_i$  по перепаду давлений в трубе Вентури, используя уравнение (1) (точки измерения 3 и 9).

**3.2.** Для измерения скорости вдоль оси струи необходимо с помощью координатника установить измерительную трубку в центре среза сопла (см. схему установки рис. 1, выходное отверстие трубы 8). После чего измерить динамическое давление на срезе сопла и рассчитать скорость по формуле

$$W_0 = \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}}}{\rho_t}}, \quad (16)$$

где  $P_{\text{дин}}$  – динамическое давление воздушного потока в соответствующей точке на оси струи, Па;

Сравнить полученное значение скорости на срезе сопла с определённым по расходу воздуха по формуле

$$W_0 = V_0 / \omega, \quad (17)$$

где  $\omega$  – площадь выходного сечения сопла,  $\text{м}^2$  (внутренний диаметр сопла  $d_0 = 0,021 \text{ м}$ ).

Расхождение между значениями скоростей не должно превышать пяти процентов. В противном случае следует повторить измерения и расчеты.

**3.3.** Устанавливая с помощью координатника измерительную трубку на разных расстояниях от среза сопла, измерить динамические давления  $P_{\text{дин}}$  в



различных точках на оси струи. Количество точек измерения и их местоположение выбирается студентом самостоятельно, при этом количество точек должно быть достаточным для построения кривой, отражающей закономерность изменения скорости вдоль оси струи.

По данным измерений динамических напоров рассчитывают скорости  $W_x$  в каждой из точек по формуле (16).

Полученные данные позволяют построить график изменения безразмерной, относительной скорости по длине струи  $\frac{W_x}{W_0}$  и сравнить полученные

экспериментальные результаты с теоретическими значениями, определенными по формуле (13), выведенной для основного участка струи.

**3.4.** Для измерения скоростей в поперечных сечениях струи, указанных преподавателем, необходимо установить измерительную трубку в центре среза сопла, после чего переместить ее с помощью координатника вдоль оси струи до указанного сечения. После этого, перемещая трубку с помощью координатника вверх и вниз от оси и измеряя через каждые два мм динамические напоры, находят границы струи, т.е. ближайшие к оси точки, в которых динамический напор равен нулю, и записывают координаты этих точек.

По результатам измерения динамических напоров вычисляют значения скоростей по формуле (16) и их безразмерных величин ( $W_y/W_x$ ), что позволяет построить эпюры скоростей в исследованных сечениях, графически определить границы струи, угол ее раскрытия и рассчитать расход воздуха  $V_x$  в данном сечении струи по формуле

$$V_x = 0,7D_x^2 \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{n}, \quad (18)$$

где  $D_x$  – диаметр струи в сечении  $x$ , т. е. расстояние между границами струи в данном сечении, м;

$W_i$  – рассчитанное значение скорости в какой-либо точке струи в рассматриваемом поперечном сечении, м/с;

$n$  – количество точек измерения скорости в данном сечении.

**3.5.** Рассчитывают значения относительных расходов  $V_x/V_0$  в исследованных сечениях и сопоставляют их с рассчитанными ранее по формуле (15).

## 5. Оформление отчёта

**4.1.** В отчёте необходимо чётко сформулировать цель работы, нарисовать схему установки с кратким её описанием, привести все необходимые расчётные формулы с пояснением входящих в них величин.

**4.2.** Заранее, ещё до начала работы, вычертить таблицы для записи результатов соответствующих измерений (рис. 5).



Сравнение результатов экспериментов с теоретическими данными  
(формула 14)

Величина			Расстояние от оси струи, мм																
			Вверх								0	Вниз							
			16	14	12	10	8	6	4	2		2	4	6	8	10	12	14	16
$\frac{W_y}{W_0}$	1	опыт																	
		Теор.																	
	2	опыт																	
		Теор.																	
	3	Опыт																	
		Теор.																	