

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания»

## **ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА И АГРЕГАТЫ НАДДУВА**

Лабораторные работы (практикум)  
для студентов специальности 37.01.01 –  
«Двигатели внутреннего сгорания»

Рекомендовано редакционно-издательским советом  
Белорусского национального технического университета

М и н с к 2 0 0 2

УДК 621.431

Практикум включает в себя лабораторные работы по курсу «Газовая динамика и агрегаты наддува» для студентов специальности «Двигатели внутреннего сгорания». В каждой работе приводятся основные понятия из теории изучаемого вопроса, дается описание экспериментальной установки, указывается порядок проведения испытаний и приводятся требования к содержанию отчета.

Составитель Г.М. Кухаренок

Рецензенты:

Н.С. Янкевич, Л.А. Молибошко

## Введение

Лабораторный практикум предназначен для студентов специальности 37.01.01 – «Двигатели внутреннего сгорания».

Основное назначение практикума – ознакомление студентов с методикой и оборудованием для экспериментальных исследований течения газов в элементах проточной части двигателей внутреннего сгорания автотракторного типа, а также практическое расширение и закрепление теоретического материала по курсу «Газовая динамика и агрегаты наддува».

Лабораторные работы носят исследовательский характер. В каждой работе приводятся основные понятия из теории изучаемого вопроса, даются описание экспериментальной установки, порядок выполнения работы, расчетные формулы, контрольные вопросы и требования к содержанию отчета.

### Общие указания по выполнению лабораторных работ

К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по правилам техники безопасности в лаборатории.

Перед началом работы студенты знакомятся с порядком ее проведения и готовят необходимые таблицы для регистрации результатов испытаний.

Отчет составляется каждым студентом. При оформлении отчета на первой странице указывается название учебного заведения и кафедры, номер и наименование работы, фамилия и инициалы студента, номер группы. На последующих страницах приводится изложение работы в соответствии с разделом инструкции «Содержание отчета».

Отчеты выполняются чернилами на листах писчей бумаги размером 297x220 мм. Графики и схемы выполняются карандашом с применением чертежных инструментов. Графики строятся на миллиметровой бумаге. Под каждым графиком и рисунком указывают его наименование.

## Лабораторная работа №1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА

#### Общие сведения

Состояние неподвижного газа характеризуется давлением  $p$  (Па), плотностью  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) и температурой  $T$  (К) – термодинамическими параметрами состояния. Вместо плотности можно использовать удельный объем  $v$  (м<sup>3</sup>/кг). При движении газа параметры состояния меняются при переходе от одной точки пространства к другой, от одного момента времени к другому.

Течение газа в трубе характеризуется объемным и массовым расходами, показывающими, сколько газа протекает через сечение трубы в единицу времени. Зная расход воздуха, можно определить среднюю скорость потока в трубе. В газовой динамике также используют безразмерные скорости  $M$  (число Маха),  $\lambda$ ,  $A$ .

Цель работы – изучение правил и приобретение навыков работы с экспериментальной установкой, определение основных параметров течения газа.

#### Экспериментальная установка

Лабораторная работа выполняется на установке, состоящей из жидкостно-кольцевого вакуумного насоса типа РМК-3, к которому может подсоединяться исследуемый объект. Насос приводится в действие электромотором мощностью 30 кВт. Для питания электромотора установлен двухмашинный агрегат с пультом управления и необходимой комплектующей аппаратурой.

Рабочим телом установки является воздух. Максимальная производительность насоса 12 м<sup>3</sup>/мин.

Количество воздуха, просасываемого насосом, регулируется изменением частоты вращения вала электромотора и количества воды, подводимой к насосу.

Расход воздуха определяется с помощью ротационного газового счетчика РГ-250.

Регулирование скоростного режима работы насоса осуществляется с пульта управления, на котором установлены кнопки пуска и регулятор частоты вращения вала электромотора.

Чтобы запустить насос, необходимо:

включить рубильник;

поставить ручку переключения электромоторов в положение I и установить регуляторы частоты вращения в минимальное положение;

нажать кнопку "пуск" двухмашинного агрегата;

открыть на 0,5...1,0 оборота вентиль на трубе, подводящей воду к насосу;

нажать кнопку "пуск" электромотора;

регулятором частот вращения установить требуемый режим работы насоса.

Для остановки насоса необходимо:

установить регулятор частоты вращения насоса в минимальное положение;

нажать кнопку "стоп" электромотора;

закрыть вентиль на трубе, подводящей воду к насосу;

нажать кнопку "стоп" двухмашинного агрегата;

выключить рубильник.

### Содержание работы

1. Заготовить таблицу результатов экспериментов по приведенной форме (табл. 1.1).
2. Запустить вакуумный насос.
3. Установить заданный преподавателем скоростной режим работы насоса.
4. Произвести измерение расхода воздуха. Результаты замеров занести в таблицу.

5. Увеличивая частоту вращения вала насоса последовательно на 100, 200, 300 и 400 мин<sup>-1</sup>, повторить измерение расхода воздуха и записать результаты в таблицу.

6. По окончании замеров выключить установку.

7. Обработать экспериментальные данные и занести их в таблицу.

#### Расчетные формулы

1. Плотность воздуха

$$\rho = \frac{P_0}{RT_0}, \text{ кг/м}^3,$$

где  $p_0$ ,  $T_0$  – давление (Па) и температура (К) воздуха в помещении;

$R=287,4$  (Дж/(кг·К)) – газовая постоянная воздуха.

2. Объемный расход воздуха определяется двумя методами.

Метод 1: 
$$G_{\text{в1}} = \frac{V_0}{t_0} \text{ м}^3/\text{с};$$

Метод 2: 
$$G_{\text{в2}} = \frac{n}{60i}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $n$  – частота вращения ротора газового счетчика, мин<sup>-1</sup>;

$i=235,95$  – передаточное отношение механизма счетчика.

3. Массовый расход воздуха

$$M_{\text{сек}} = G_{\text{в}} \cdot \rho, \text{ кг/с.}$$

4. Средняя скорость воздушного потока на входе в счетчик

$$w = \frac{G_{\text{в}}}{f}, \text{ м/с},$$

где  $f$  – площадь входного патрубка.

5. Скорость распространения звука в воздушной среде

$$a = \sqrt{kRT} = 20,1\sqrt{T}, \text{ м/с,}$$

где  $k=1,4$  – показатель изэнтропы.

6. Критическая скорость воздушного потока

$$w_{кр} = a_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1}RT_0} = 18,31\sqrt{T_0}, \text{ м/с,}$$

где  $T_0$  – температура заторможенного потока (в нашем случае окружающей среды).

7. Максимальная скорость воздушного потока

$$w_{max} = \sqrt{\frac{2k}{k-1}RT_0} = 44,8\sqrt{T_0}, \text{ м/с.}$$

8. Безразмерные скорости:

число Маха

$$M = \frac{w}{a},$$

приведенные скорости

$$\lambda = \frac{w}{a_{кр}};$$

$$\Lambda = \frac{w}{w_{max}}.$$

## Контрольные вопросы

1. Как запустить (остановить) вакуумный насос?
2. Как определяется объемный расход воздуха?
3. Какая скорость называется скоростью звука, критической и максимальной скоростью течения газа?
4. По каким формулам определяются скорость звука, критическая и максимальная скорости течения газа?
5. Как определяются безразмерные скорости: число Маха, приведенные скорости  $\lambda$  и  $\Lambda$ ?

## Содержание отчета

1. Записать правила работы с вакуумным насосом.
2. Дать краткое описание порядка выполнения работы.
3. Привести результаты экспериментов.
4. Провести анализ полученных результатов.

Таблица 1.1

Результаты определения основных параметров потока газа  
( $p_0 = \dots$  Па;  $T_0 = \dots$  К;  $a = \dots$  м/с;  $w_{кр} = \dots$  м/с;  $w_{max} = \dots$  м/с)

№ п/п	Метод 1			Метод 2		$M_{сек},$ кг/с	$w,$ м/с	M	$\lambda$	$\Lambda$
	$V_{o},$ м <sup>3</sup>	$t_o,$ с	$G_{B1},$ м <sup>3</sup> /с	n, мин <sup>-1</sup>	$G_{B2},$ м <sup>3</sup> /с					

## Лабораторная работа №2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА В ДОЗВУКОВОМ КОНФУЗОРЕ И ДИФFUЗОРЕ

#### Общие сведения

Каналы с сужающейся входной и расширяющейся выходной частью довольно широко применяются в технике. Канал, в котором поток движется с увеличением скорости, называется конфузуром или соплом, а при движении с уменьшением скорости – диффузором. При дозвуковом течении газа конфузор представляет собой суживающийся канал, а диффузор – расширяющийся. При определении параметров газа в канале пользуются моделью энергоизолированного потока (пренебрегая теплообменом между газом и окружающей средой). Для случая энергоизолированного течения газа температура торможения вдоль оси канала остается неизменной и равной температуре окружающей среды, а давление торможения уменьшается вследствие наличия потерь на трение и гидравлических потерь.

В дозвуковом конфузуре происходит расширение воздуха. При этом скорость потока вдоль оси канала возрастает, статическое давление, температура и плотность уменьшаются. В дозвуковом диффузоре происходит сжатие воздуха, скорость потока уменьшается, а статическое давление, температура и плотность возрастают. В поперечном сечении канала статическое давление остается постоянным, а давление торможения у стенок канала меньше, чем на оси, из-за наличия потерь на трение в пограничном слое. В результате скорость течения у стенок канала также будет меньше. В диффузоре уменьшение давления торможения и скорости по направлению к стенке более значительное, чем в конфузуре.

Максимальная скорость течения имеет место в горловине канала. Для обеспечения дозвукового режима течения необходимо, чтобы статическое давление в горловине канала было больше критического, которое приближенно определяется из соотношения

$$p_{кр} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \cdot p_0,$$

где  $k$  – показатель изоэнтропы;

$p_{кр}$  – критическое давление. Для воздуха  $k=1,4$  и отношение  $(2/(k+1))^{k/(k-1)} = 0,5283$ .

Цель работы – исследование изменения статического давления, давления торможения и скорости воздуха в различных сечениях дозвукового конфузора и диффузора.

### Экспериментальная установка

Схема установки представлена на рис. 2.1. Установка состоит из дозвукового канала 1, включающего в себя конфузор и диффузор, и канала подсоединенного к вакуумному насосу. Под действием разрежения, создаваемого насосом, воздух из атмосферы поступает в канал. В стенке канала в сечениях I-I, II-II, III-III, IV-IV, V-V, VI-VI просверлено 6 отверстий диаметром 0,7 мм, служащих для определения статического давления. В сечениях II-II и V-V установлены трубки 2 для измерения давления торможения в поперечном сечении канала. Перемещение трубок осуществляется микрометрическими винтами 3.

### Порядок выполнения работы

1. Подготовить таблицы результатов испытаний (табл. 2.1 и 2.2).
2. Запустить вакуумный насос.
3. Установить заданную преподавателем величину разрежения в горловине канала.
4. Замерить и записать в табл. 2.1 показания пьезометров, измеряющих статическое давление.
5. Перемещая с помощью микрометрического винта трубку, служащую для замера давления торможения в конфузоре, измерить разрежение  $\Delta P^*_2$  в точках 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и записать результаты замера в табл. 2.2.
6. Убрать из потока трубку для замера давления торможения в конфузоре.

7. Аналогично п.5 измерить и записать разрежение  $\Delta P^*_5$  в точках 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 диффузора.
8. Убрать из потока трубку для замера давления торможения в диффузоре.
9. Выключить установку.
10. Вычислить значения параметров потока в исследуемых точках и записать в табл. 2.1 и 2.2.
11. Построить график изменения статического давления вдоль оси канала (рис. 2.2).
12. Построить эпюры скоростей в конфузоре и диффузоре (рис. 2.3).

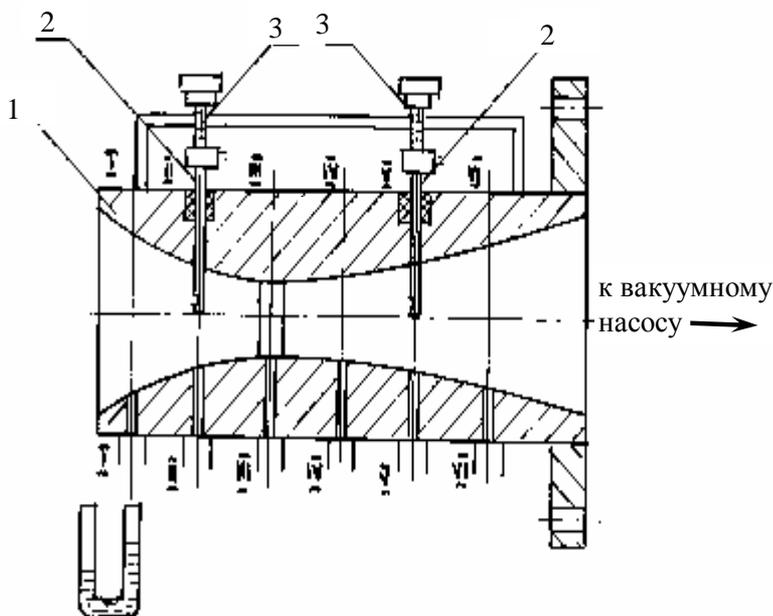


Рис. 2.1. Схема установки для исследования движения воздуха в дозвуковом конфузоре и диффузоре

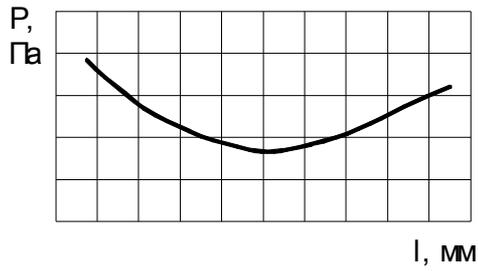


Рис. 2.2. Изменение статического давления вдоль оси канала

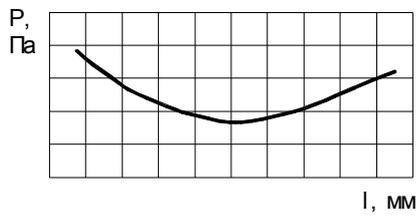


Рис. 2.2. Изменение статического давления вдоль оси канала

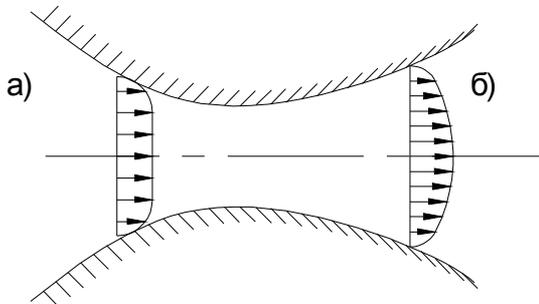


Рис. 2.3. Эпюры скоростей в конфузоре и диффузоре:  
а) – конфузор; б) – диффузор

## Расчетные формулы

1. Статическое давление в  $n$ -м сечении канала определяется по выражению

$$p_n = p_o - \Delta p_n,$$

где  $p_o$  – давление окружающей среды, Па;

$\Delta p_n$  – величина разрежения в рассматриваемом сечении, Па.

2. Давление торможения в  $i$ -й точке по радиусу сечения:

$$p_{ni}^* = p_o - \Delta p_{ni}^*,$$

где  $\Delta p_{ni}^*$  – величина разрежения торможения в  $i$ -й точке.

3. Средняя величина полного давления по площади поперечного сечения канала

$$p_{cp}^* = \frac{1}{F} \sum_1^i p_i^* dF_i,$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения канала в мерном сечении, мм<sup>2</sup>;

$p_i^*$  – замеренное давление торможения, Па;

$i$  – точка замера.

4. Скорость в рассматриваемой точке сечения

$$w_i = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R \cdot T^* \left[ 1 - \left( \frac{p_n}{p_{ni}^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]},$$

где  $k$  – показатель изоэнтропы для воздуха;

$T^*$  – температура торможения, равная температуре окружающей среды, К;

$R$  – газовая постоянная, Дж/кг К.  
Для воздуха ( $\kappa = 1,4$ ;  $R = 287,4$  Дж/кг·К) формула принимает вид

$$w_i = \sqrt{2010 \cdot T^* \left[ 1 - \left( \frac{P_n}{P_{ni}^*} \right)^{0,286} \right]}.$$

5. Средняя скорость потока в рассматриваемом сечении

$$w_n = \sqrt{2010 \cdot T^* \left[ 1 - \left( \frac{P_n}{P_{cp}^*} \right)^{0,286} \right]}.$$

#### Контрольные вопросы

1. Какой канал называется конфузуром, диффузором?
2. Как изменяются параметры потока газа вдоль оси конфузурора, диффузора?
3. При каких условиях течение газа является энергоизолированным?
4. Как измеряется статическое и полное давление в потоке?
5. Как изменяются параметры газа в поперечном сечении конфузурора и диффузора?
6. При каких условиях течение газа в суживающемся канале будет дозвуковым?

#### Содержание отчета

1. Схема канала и краткое описание порядка проведения работы.
2. Таблица испытаний.
3. График изменения статического давления вдоль оси канала.
4. Эпюры скоростей в конфузуре и диффузуре.
5. Выводы по работе.

Таблица 2.1

Результаты исследования движения воздуха в  
дозвуковом конфузоре и диффузоре

(температура окружающей среды  $T_0 = \dots$  К; атмосферное давление  $P_0 = \dots$  Па)

Номер сечения	Диаметр сечения $D$ , мм	Площадь сечения $F$ , мм <sup>2</sup>	Разрежение $\Delta p$ , Па	Статическое давление $p$ , Па
I				
II				
III				
IV				
V				
VI				

Таблица 2.2

Определение скорости течения воздуха в конфузоре и диффузоре

№ точки замера	Расстояние от оси канала, мм	Конфузор				Диффузор					
		Разрежение $\Delta p^*$ , Па	Давление торможения $p_{2, \text{торм}}^*$ , Па	Среднее давление торможения $p_{2, \text{ср}}^*$ , Па	Скорость течения $w_2$ , м/с	Средняя скорость течения $w_{2, \text{ср}}$ , м/с	Разрежение $\Delta p_{2, \text{торм}}^*$ , Па	Давление торможения $p_{2, \text{торм}}^*$ , Па	Среднее давление торможения $p_{2, \text{ср}}^*$ , Па	Скорость течения $w_2$ , м/с	Средняя скорость течения $w_{2, \text{ср}}$ , м/с
1	0										
2	2										
3	4										
4	6										
5	8										
6	10										
7	12										

## Лабораторная работа №3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ТОНКОЙ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЕ

#### Общие сведения

Современные представления о механизме сопротивления тел, обтекаемых потоком газа, и методы расчета сопротивления основываются на теории пограничного слоя. При обтекании твердого тела реальным газом действие сил вязкости сосредотачивается в области потока, непосредственно прилегающего к поверхности обтекаемого тела. Эта область называется пограничным слоем. В пограничном слое скорость меняется от нуля на поверхности тела до скорости внешнего потока (рис. 3.1).

Вне пограничного слоя поток является потенциальным. При исследовании течения вязкого газа все поле течения можно разбить на две области: пограничный слой и потенциальный поток. Пограничный слой рассчитывается методом теории вязкой жидкости.

При обтекании тела газом внешнюю границу пограничного слоя проводят там, где местная скорость отличается от скорости внешнего потока  $w_0$  на 1% (рис. 3.1, б). Расстояние от стенки тела до внешней границы пограничного слоя называется толщиной пограничного слоя  $\delta$ . Толщина пограничного слоя в носовой точке тела равна нулю и по длине обтекаемой поверхности постепенно нарастает. Сопротивление обтекаемых поверхностей зависит от режима течения в слое, который может быть ламинарным или турбулентным. При турбулентном течении в пограничном слое сопротивление трения больше. Переход ламинарного течения в турбулентное происходит при определенном значении числа Рейнольдса

$$Re_{кр} = 10^5 \dots 10^6.$$

При расчетах пограничного слоя пользуются интегральным соотношением Кармана. Это соотношение выведено исходя из постоянства скорости во внешнем потоке  $w_0 = \text{const}$  и отсутствия продольного градиента давления  $dp/dx=0$ , без учета сжимаемости газа ( $M < 0,3$ ).

Цель работы – определение параметров пограничного слоя на плоской пластине (эпюры скоростей, толщины пограничного слоя и

числа Рейнольдса), сравнение опытных и расчетных значений толщины пограничного слоя.

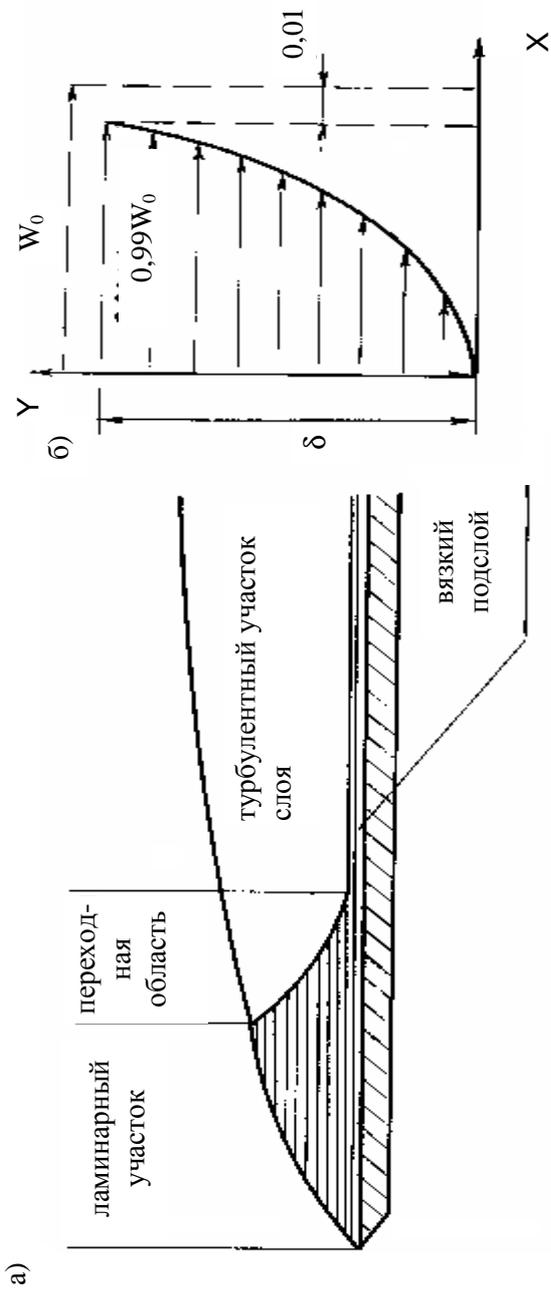


Рис. 3.1. Схема пограничного слоя на плоской пластине:

- а) изменение толщины и структуры слоя вдоль пластины;
- б) эпюра скоростей в поперечном сечении пограничного слоя.

### Экспериментальная установка

Схема установки представлена на рис. 3.2. Тонкая пластина 1, на поверхности которой исследуются параметры пограничного слоя, расположена внутри канала прямоугольного сечения 2. Стенки канала выполнены из прозрачной пластмассы. Для создания изогradientного потока канал над пластиной выполнен слегка расширяющимся. Канал подсоединен к вакуумному насосу, с помощью которого осуществляется изменение скорости течения.

В сечениях I, II, III пластины просверлены отверстия, соединенные трубками с водяными пьезометрами, которыми измеряется величина статического давления на поверхности пластины. В этих же сечениях с помощью трубок Пито диаметром 0,2 мм, перемещающихся по нормали к пластине при вращении микрометрических винтов 3, измеряется давление торможения в пограничном слое. Регистрация величины этого давления осуществляется спиртовым микроманометром.

### Порядок выполнения работы

1. Подготовить таблицу результатов испытаний (табл. 3.1).
2. Включить установку и, изменяя режимы работы вакуумного насоса, установить заданное преподавателем разрежение в сечении I (скорость внешнего потока).
3. Измерить и записать в таблицу показания пьезометров статического давления в сечениях I, II, III.
4. Трубку Пито, расположенную в сечении I, установить на поверхности пластины (расстояние от оси трубки до поверхности пластины 0,15 мм) и измерить давление торможения. Результаты записать в таблицу.
5. Перемещая трубку на 0,1 мм (три раза), а затем на 0,5 мм от поверхности пластины, измерять и записывать в таблицу величину давления торможения в поперечном сечении пограничного слоя. Измерения производить до тех пор, пока показания микроманометра при перемещении трубки не будут изменяться.
6. Переместить трубку, установленную в сечении I, к стенке канала.
7. Провести опыты по п. 4, 5 в сечениях II, III.
8. Выключить установку.

9. Для различных сечений пограничного слоя подсчитать значения скорости потока, чисел Рейнольдса и толщины слоя.

10. Построить эпюры скоростей в различных сечениях пограничного слоя и определить по ним опытные значения толщины пограничного слоя.

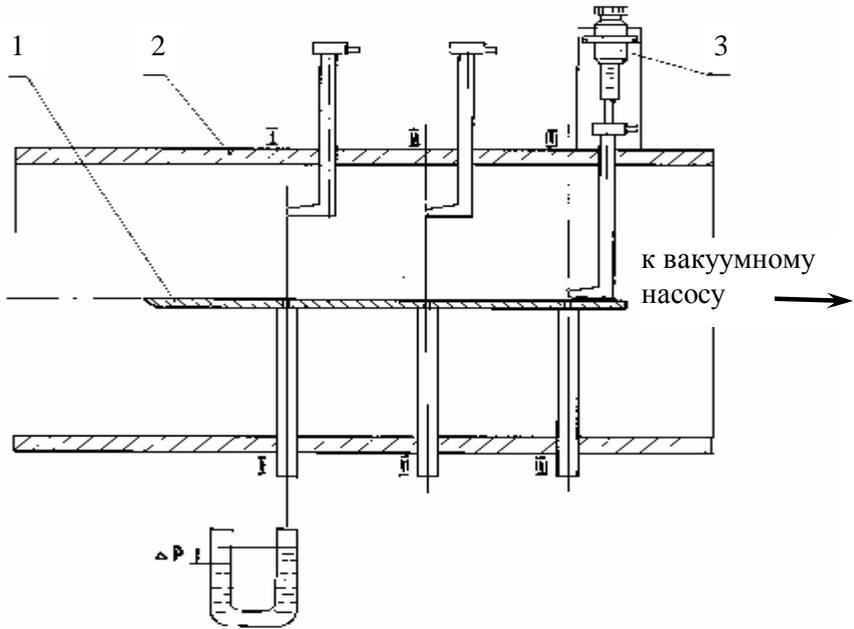


Рис. 3.2. Схема экспериментальной установки для исследования пограничного слоя

### Расчетные формулы

#### 1. Статическое давление на поверхности пластины

$$p = p_0 - \Delta p_{cp},$$

где  $\Delta p_{cp}$  – среднее арифметическое значение разрежения, замеренного в сечениях I, II, III, Па.

2. Давление торможения в  $i$ -й точке сечения

$$p_i^* = p_0 - Dp_i^*,$$

где  $Dp_i^*$  – замеренная величина разрежения в рассматриваемой точке, Па.

3. Газодинамическая функция

$$\pi(\lambda_i) = \frac{P}{P_i}.$$

По значениям этой функции с помощью таблиц газодинамических функций определяют коэффициент скорости  $\lambda_i$ .

4. Критическая скорость

$$a_{кр} = 18,31\sqrt{T^*},$$

где  $T^* = T_0$  – температура окружающей среды, К.

5. Скорость потока

$$w_i = \lambda_i \cdot a_{кр}.$$

6. Статическая температура внешнего потока

$$T = T_0 - \frac{w_0^2}{2 \cdot C_p},$$

где  $C_p$  – теплоемкость газа. Для воздуха  $C_p = 1005$  Дж/(кг·К).

7. Динамический коэффициент вязкости воздуха

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{273} \right)^{0,79},$$

где  $\mu_0$  – значение вязкости при  $T = 273$  К. Для воздуха  $\mu_0 = 17,2 \cdot 10^{-6}$  Н·с/м<sup>2</sup>.

8. Кинематический коэффициент вязкости

$$\nu = \frac{\mu}{\rho},$$

где  $\rho$  – плотность воздуха в помещении,  $\text{кг/м}^3$ .

$$\rho = \frac{P_o}{R \cdot T_o}.$$

#### 9. Число Рейнольдса

$$Re = \frac{w_o \cdot x}{\nu},$$

где  $x$  – расстояние от переднего края пластины до данного сечения, м.

#### 10. Толщина пограничного слоя:

$$\text{ламинарного} - \delta = \frac{5,83 \cdot x}{\sqrt{Re_x}};$$

$$\text{турбулентного} - \delta = 0,38x \cdot Re_x^{-0,2},$$

где  $Re_x$  – число Рейнольдса, определенное для сечения, находящегося на расстоянии  $x$  от переднего края пластины.

Т а б л и ц а 3.1

**Результаты исследований пограничного слоя на плоской пластине**  
 (температура окружающей среды  $T_0 = \dots$  К; атмосферное давление  $p_0 = \dots$  Па;  
 скорость внешнего потока  $w_0 = \dots$  м/с)

№ сечения	Расстояние от края пластины $x$ , мм	№ точек замера давления торможения	Расстояние от поверхности пластины $h$ , мм	Разрежение $\Delta p$ , Па	Статическое давление $p$ , Па	Разрежение $\Delta p^*_{i1}$ , Па	Давление торможения, $p^*$ , Па	Газодинамическая функция $\pi$ ( $\lambda$ )	Безразмерная скорость $\lambda_i$	Критическая скорость $a_{кр}$ , м/с	Скорость потока $w_i$ , м/с	Число Рейнольдса $Re$	Режим течения	Значение толщины пограничного слоя $d$ , мм	
														опытное	расчетное
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
I	300	1													
		2													
		3													
		4													
		5													
		6													

Окончание табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
II	600	1														
		2														
		3														
		4														
		5														
		6														
III	900	1														
		2														
		3														
		4														
		5														
		6														

### Контрольные вопросы

1. Что называется пограничным слоем?
2. Как определяется внешняя граница пограничного слоя?
3. Как изменяются скорость и давление торможения в поперечном сечении пограничного слоя?
4. Какие режимы течения возможны в пограничном слое и как они определяются?
5. По каким зависимостям рассчитываются параметры пограничного слоя?

### Содержание отчета

1. Краткое описание экспериментальной установки и порядок выполнения работы.
2. Таблицы результатов испытаний.
3. Эпюры скоростей в сечениях I, II, III.
4. Выводы.

## Лабораторная работа №4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ НА ПАРАМЕТРЫ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ЦИЛИНДРЕ

#### Общие сведения

Течение газов в элементах проточной части тепловых машин часто сопровождается подводом теплоты к газам извне или отводом теплоты во внешнюю среду. Примерами являются течения в теплообменниках, камерах сгорания, впускных трубопроводах карбюраторных двигателей и т.п.

Все виды течения можно рассматривать как движение газа по трубе с внешним теплообменом. Под влиянием теплового воздействия меняются параметры течения газа. Для изучения особенностей теплового воздействия на параметры потока рассматривают течение газа в неподвижной цилиндрической трубе, считая, что трение отсутствует. Связь между скоростью потока и изменением количества подводимой (отводимой) теплоты для этого случая определяется соотношением

$$\frac{dw}{w}(M^2 - 1) = -\frac{k-1}{a^2} dQ_e,$$

где  $w$  – скорость потока;

$M$  – число Маха;

$k$  – показатель изоэнтропы;

$a$  – скорость звука;

$dQ_e$  – изменение количества подводимой теплоты.

Из этого уравнения следует, что в дозвуковом потоке ( $M < 1$ ) подвод теплоты ( $dQ_e > 0$ ) ведет к увеличению скорости ( $dw > 0$ ); в сверхзвуковом потоке ( $M > 1$ ) – к уменьшению скорости ( $dw < 0$ ). Отвод теплоты оказывает противоположное влияние на скорость течения.

Если на начальном участке трубы подводить теплоту, а затем отводить, то получим сопло, которое преобразует дозвуковой поток в сверхзвуковой (рис. 4.1)

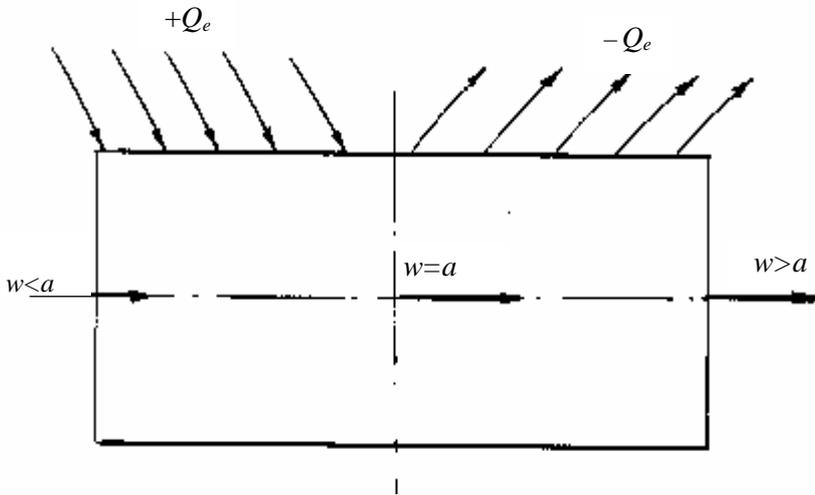


Рис. 4.1. Схема теплового сопла

Из теории теплового сопла известно, что подвод теплоты к газу, движущемуся с дозвуковой скоростью в цилиндрической трубе, вызывает увеличение скорости течения, падение статического давления и давления торможения, рост температуры торможения, а также уменьшение расхода газа через трубу. Падение давления торможения в результате подвода теплоты называется тепловым сопротивлением.

Цель работы – исследование влияния подогрева на дозвуковой поток воздуха в цилиндрической трубе.

## Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рис. 4.2. Она представляет собой цилиндрическую трубу 1 с внутренним диаметром 8 мм, через которую вакуумным насосом просасывается воздух.

В стенке трубы в сечениях I, II, III, IV, V просверлено 5 отверстий, служащих для измерения статического давления. В сечении V, расположенном на выходе из трубы, трубкой Пито 4 измеряется давление торможения. Приемное отверстие трубки расположено на оси канала.

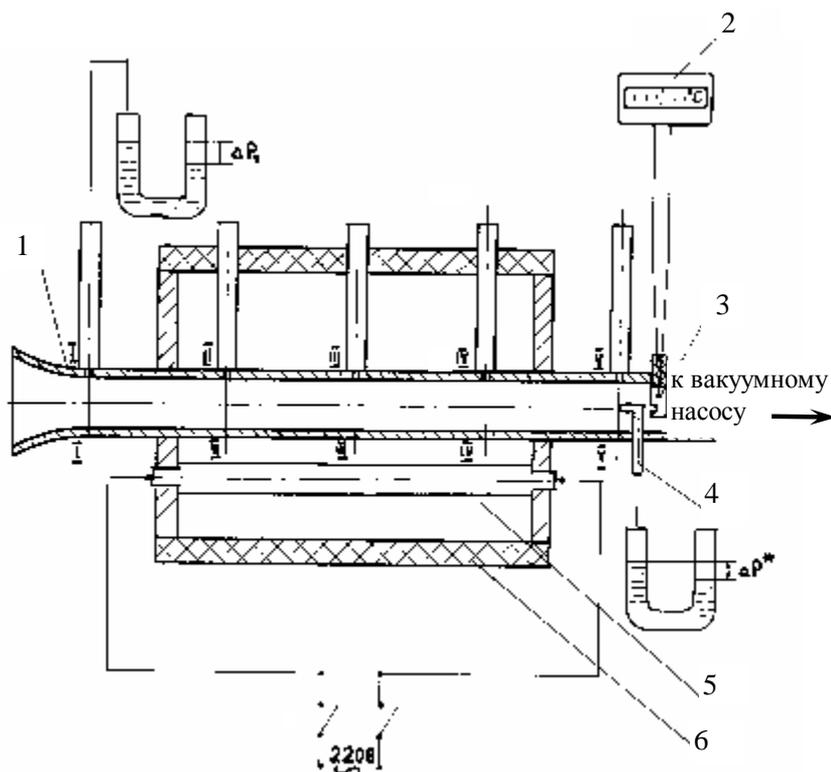


Рис. 4.2. Схема экспериментальной установки для исследования влияния подвода теплоты на параметры течения газа в цилиндрической трубе

Схема установки приведена на рис. 4.2. Она представляет собой цилиндрическую трубу 1 с внутренним диаметром 8 мм, через которую вакуумным насосом просасывается воздух.

В стенке трубы в сечениях I, II, III, IV, V просверлено 5 отверстий, служащих для измерения статического давления. В сечении V, расположенном на выходе из трубы, трубкой Пито 4 измеряется давление торможения. Приемное отверстие трубки расположено на оси канала.

Подогрев трубы осуществляется двумя теплоэлектронагревателями 5. Снаружи труба и нагреватели закрыты теплоизоляционным кожухом 6. Температура торможения воздуха на выходе из трубы определяется с помощью хромель-копелевой термопары 3. Значение температуры определяются по показаниям электронного потенциометра 2.

#### Порядок выполнения работы

1. Подготовить таблицу результатов испытаний (табл. 4.1).
2. Включить установку и установить заданный преподавателем режим работы вакуумного насоса.
3. Измерить и записать в таблицу показания пьезометров и температуру торможения.
4. Включить подогрев.
5. При температуре воздуха на выходе из трубы, равной 40, 60, 80, 100 и 120 °С, провести замеры по п.3.
6. Выключить подогрев.
7. Выключить установку.
8. Вычислить значения параметров потока в исследованных точках и записать их в таблицу.
9. Построить график зависимости расхода воздуха от температуры на выходе из трубы (рис. 4.3).

#### Расчетные формулы

1. Статическое давление на поверхности пластины

$$p_i = p_o - \Delta p_i,$$

где  $i$  – номер сечения;  
 $\Delta p_i$  – разрежение, Па.

Т а б л и ц а 4.1

Результаты исследования влияния подвода теплоты на параметры течения газа в цилиндрической трубе  
(температура окружающей среды  $T_0 = \dots K$ ; атмосферное давление  $p_0 = \dots Pa$ )

№ замера	Температура торможения на выходе из трубы $T^*, K$	Разрежение $\Delta p_i, Pa$					Статическое давление $p_i, Pa$					Параметры потока на входе в трубу					Параметры потока на выходе из трубы			
		сечение I	сечение II	сечение III	сечение IV	сечение V	сечение I	сечение II	сечение III											

## 2. Давление торможения

$$p^* = p_o - \Delta p^* , ,$$

где  $\Delta p^*$  – разрежение, замеренное трубкой Пито, Па.

## 3. Газодинамическая функция

$$\pi(\lambda) = \frac{P}{P^*} ,$$

она определяется для сечения I и сечения V. При определении  $\pi(\lambda)$  для сечения I давление торможения принимается равным атмосферному давлению.

По значению  $\pi(\lambda)$  с помощью таблиц газодинамических функций определяются коэффициенты скорости  $\lambda_1$  и  $\lambda_5$  при  $k=1,4$ .

## 4. Критическая скорость

$$a_{кр} = 18,31\sqrt{T^*} .$$

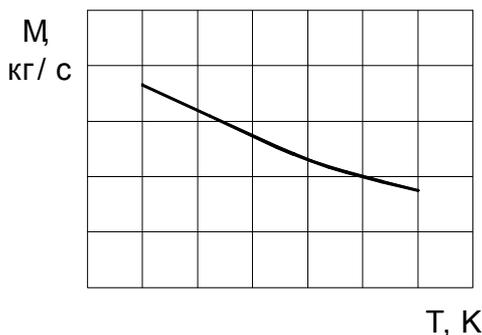


Рис. 4.3. График зависимости расхода воздуха от температуры на выходе из трубы

## 5. Скорость потока

$$w = \lambda \cdot a_{кр} .$$

## 6. Расход воздуха через трубу

$$M_{\text{сек}} = m \cdot F \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} q(\lambda_1),$$

где  $m$  – постоянный коэффициент, зависящий от состава газа (для воздуха  $m=0,04037$ );

$F$  – площадь поперечного сечения трубы,  $\text{см}^2$ ;

$p_1^* = p_0$  – давление торможения на входе в трубу, Па;

$T_1^* = T_0$  – температура торможения на входе в трубу, К;

$q(\lambda_1)$  – газодинамическая функция расхода (находится по таблицам газодинамических функций по  $\lambda_1$  при  $k = 1,4$ ).

### Контрольные вопросы

1. Какие виды внешних воздействий вы знаете?
2. Как изменяется скорость дозвукового потока газа в цилиндрической трубе при подогреве?
3. Что называется тепловым соплом?
4. Как изменяются статическое давление и давление торможения дозвукового потока газа в цилиндрической трубе при прогреве?
5. Как влияет подвод теплоты на расход газа через цилиндрическую трубу?
6. Что называется тепловым сопротивлением?

### Содержание отчета

1. Краткое описание экспериментальной установки и порядка выполнения работы.
2. Таблица результатов испытаний.
3. График зависимости расхода воздуха от температуры на выходе из трубы.
4. Сравнение параметров потока при различных значениях температуры воздуха на выходе из трубы.
5. Выводы.

## Лабораторная работа №5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА И ЭФФЕКТИВНОГО ПРОХОДНОГО СЕЧЕНИЯ ВПУСКНОГО КЛАПАНА

#### Общие сведения

Одним из основных факторов, влияющих на наполнение двигателя, являются потери энергии, возникающие в горловине впускного клапана. Эта горловина представляет собой канал сложной формы и переменного сечения. Потери в горловине включают потери на трение и на отрыв потока. Потери на трение можно определить, применяя методику расчета пограничного слоя. Однако эти расчеты довольно громоздки. Методы расчета потерь на отрыв потока от стенок канала в настоящее время еще не разработаны. Поэтому на практике для оценки пропускной способности впускного клапана обычно пользуются коэффициентом расхода ( $\mu$ ), который определяется экспериментально.

При расчетах наибольшее распространение получил коэффициент расхода, который представляет собой отношение действительного расхода газа через клапан к теоретическому расходу. Он зависит от размеров клапана, его формы, расположения горловины клапана относительно стенок цилиндра, высоты подъема клапана и других факторов.

Наряду с коэффициентом расхода на практике в качестве показателя совершенства впускного клапана двигателя внутреннего сгорания применяется величина его эффективного проходного сечения, т.е. произведение коэффициента расхода клапана ( $\mu$ ) на величину минимального проходного сечения ( $f_{кл}$ ) при данном подъеме клапана ( $h_{кл}$ ). Эта величина входит в число параметров, которыми задаются граничные условия при решении задач газообмена в двигателях.

Цель работы – исследование влияния высоты подъема на коэффициент расхода и эффективное проходное сечение впускного клапана.

## Экспериментальная установка

Экспериментальная установка показана на рис. 5.1.

Она состоит из вакуумного насоса 1, ротационного газового счетчика 2, гильзы 3, головки цилиндра 4, пьезометров 5 и 6, микрометрического винта 7.

Гильза 3 изготовлена из органического стекла. Верхним торцом она прижата к головке цилиндра, нижним торцом соединена с газовым счетчиком. Последний соединен с вакуумным насосом, который используется для просасывания воздуха через испытываемую впускную систему.

Величина подъема впускного клапана ( $h_{кл}$ ) изменяется с помощью регулировочного винта и регистрируется индикаторной головкой часового типа. Пьезометром 5 определяется разрежение в клапанной щели, пьезометром 6 – в цилиндре.

### Содержание работы

1. Заготовить таблицу результатов экспериментов по приведенной форме (табл. 5.1).
2. Установить необходимую величину подъема клапана.
3. Запустить вакуумный насос.
4. Изменяя количество просасываемого насосом воздуха, установить перепад давления  $\Delta p_2 = 4000$  Па по пьезометру, установленному в цилиндре.
5. Произвести измерение расхода воздуха, разрежения в клапанной щели. Результаты замеров занести в таблицу.

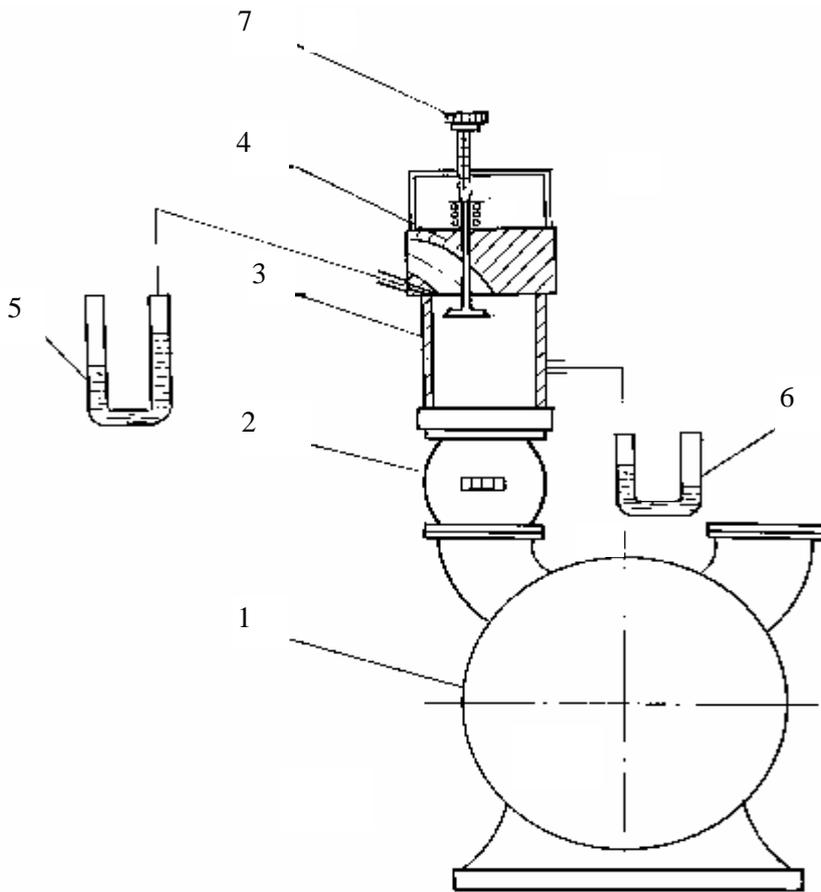


Рис. 5.1. Схема экспериментальной установки для определения пропускных свойств впускного клапана

6. Изменяя подъем клапана на заданную величину, повторить действия по пп. 4 и 5.

7. По окончании замеров выключить установку.

8. Вычислить значения коэффициентов расхода и эффективного проходного сечения клапана и записать их в таблицу.

9. Построить графики зависимости  $\mu$  и  $\mu_f$  от высоты подъема клапана (рис. 5.2).

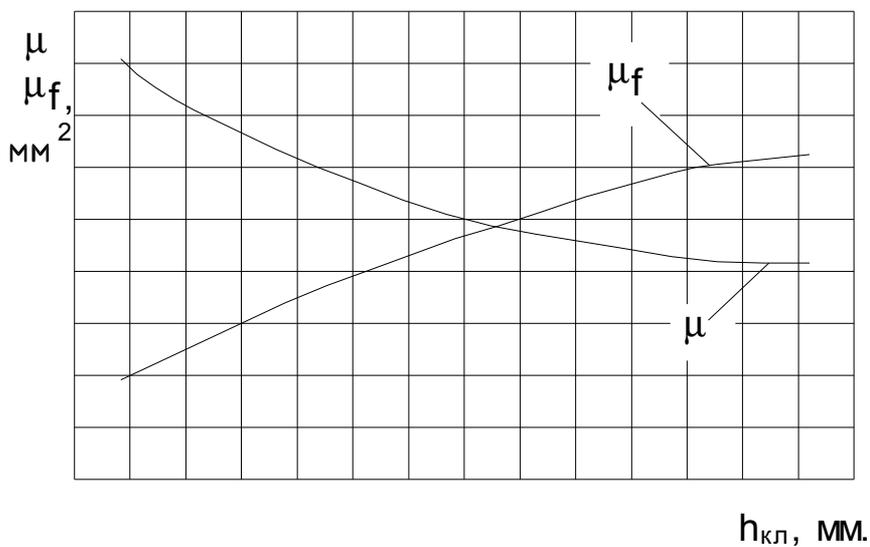


Рис. 5.2. Зависимость коэффициента расхода воздуха и эффективного проходного сечения от высоты подъема клапана

### Расчетные формулы

1. Статическое давление в клапанной щели

$$p_1 = p_o - \Delta p_1,$$

где  $\Delta p_1$  – разрежение в клапанной щели, Па.

Таблица 5.1

Результаты определения коэффициентов расхода и эффективного проходного сечения для систем "клапан-цилиндр" и "канал-клапан-цилиндр" (температура окружающей среды  $T_0=...K$ ; атмосферное давление  $p_0=...Па$ )

№ замера	Высота подъема клапана $h_{кл}$ , мм	Показания тахометра $n$ , мин <sup>-1</sup>	Разрежение, Па		Давление, Па		Площадь проходного сечения клапанной щели $f_{кл}$ , м <sup>2</sup>	Теоретическая скорость, м/с		Плотность воздуха, кг/м <sup>3</sup>		Теоретический расход воздуха, кг/с		Действительный расход воздуха $M_{сек}$ , кг/с	Коэффициент расхода		Эффективное проходное сечение, м <sup>2</sup>		
			$\Delta p_1$	$\Delta p_2$	$P_1$	$P_2$		$w_1$	$w_2$	$\rho_1$	$\rho_2$	$M_{сек1}$	$M_{сек2}$		$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_{1f}$	$\mu_{2f}$	
1	2																		
2	4																		
3	6																		
4	8																		
5	10																		
6	12																		

## 2. Теоретическая скорость воздуха в клапанной щели

$$w_T = \sqrt{2RT_0 \frac{k}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

где  $R$  – газовая постоянная воздуха ( $R=287,4$  Дж/кг·К);

$T_0$  – температура в помещении, К;

$p_1$  – давление воздуха в клапанной щели, Па;

$k$  – показатель изэнтропы ( $k=1,4$ ).

## 3. Площадь проходного сечения клапанной щели

$$f_{кл} = p \cdot h_{кл} (0,707 \cdot d + 0353 \cdot h_{кл}) \cdot 10^{-6} \text{ (м}^2\text{)},$$

где  $d$  – диаметр горловины клапана, мм;

$h_{кл}$  – высота подъема клапана, мм.

## 4. Плотность воздуха в клапанной щели

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1},$$

где  $T_1$  – температура воздуха в клапанной щели (принимается равной температуре окружающей среды  $T_0$ ).

## 5. Теоретический расход воздуха

$$M_{сек_T} = f_{кл} \cdot \rho_1 \cdot w_T \cdot$$

## 6. Действительный расход воздуха

$$M_{сек} = \frac{V_0}{t} \cdot \rho_0,$$

где  $\rho_0$  – плотность воздуха в помещении, кг/м<sup>3</sup>;

$V_0$  – расход воздуха за опыт, м<sup>3</sup>;

$t$  – время опыта, с.

## 7. Коэффициент расхода клапана

$$\mu = \frac{M_{сек}}{M_{сек_t}}.$$

### Контрольные вопросы

1. Что называется эффективным проходным сечением впускного клапана?
2. Для чего необходимо знать величины коэффициентов расхода и эффективного проходного сечения впускного клапана?
3. Как выводится формула для определения теоретической скорости воздуха в проходном сечении клапана?
4. Каким образом измеряется действительный расход воздуха при выполнении работы? Какие способы замеров вы еще знаете?

### Содержание отчета

1. Дать краткое описание порядка выполнения работы.
2. Начертить схему экспериментальной установки.
3. Привести результаты экспериментов и построить графические зависимости коэффициента расхода и эффективного проходного сечения от высоты подъема клапана.
4. Провести анализ полученных результатов.

## Лабораторная работа №6

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОТЕРЬ КАНАЛА

#### Общие сведения

Для оценки аэродинамического совершенства каналов (в том числе и каналов газообмена двигателей) обычно используют коэффициент внутренних потерь (сопротивления)  $\zeta$ . Коэффициент  $\zeta$  выражает потери энергии  $l_n$  как некоторую долю кинетической энергии стационарного потока:

$$l_n = \zeta \frac{w^2}{2}.$$

В общем случае для одномерного стационарного течения энергия  $l$  определяется как работа  $L$ , отнесенная к единице времени и единице массы газа  $\left( l = L / (mdt) \right)$ , т.е. как энергия, эквивалентная мощности единицы массы газа.

Рассмотрим способ экспериментального определения коэффициента потерь  $\zeta$  на примере течения несжимаемого газа (воздуха) в колене (рис. 6.1).

Для сечений 1–1 и 2–2 исследуемого потока уравнение Бернулли имеет вид

$$p_1 + \rho \frac{w^2}{2} = p_2 + \rho \frac{w_2^2}{2} + \zeta \rho \frac{w_2^2}{2}.$$

В этом уравнении слагаемые вида  $p + \rho w^2 / 2$  являются давлениями заторможенного потока, следовательно, коэффициент потерь выражает относительную долю потерь полного давления:

$$\zeta = \frac{p_1^* - p_2}{\rho \cdot w_2^2 / 2}.$$

Из формулы следует, что при проведении экспериментальных исследований необходимо определить потери полного давления и динамический напор.

Давления заторможенного потока измеряются с помощью приемника полного давления (трубки Пито). Величина скорости в канале определяется по уравнению неразрывности для одномерного потока. Если площадь сечения канала не изменяется, то для несжимаемого потока скорость в сечениях 1–1 и 2–2 одинакова.

Цель работы – определение коэффициента потерь при течении газа в колене с различным углом поворота потока.

### Экспериментальная установка

Исследуемое колено устанавливается на экспериментальную установку, показанную на рис. 5.1, вместо головки цилиндра. В сечениях 1–1 и 2–2 трубкой Пито измеряются давления заторможенного потока.

### Содержание работы

1. Заготовить таблицу результатов экспериментов по приведенной форме (табл. 6.1).
2. Установить опытный канал с углом поворота потока  $90^{\circ}$ .
3. Запустить вакуумный насос.
4. Установить частоту вращения вала насоса по указанию преподавателя.
5. Произвести измерения расхода воздуха и давления заторможенного потока в сечениях 1–1 и 2–2. Результаты замеров занести в таблицу.
6. Увеличивая частоту вращения вала насоса на 100, 200, 300 и  $400 \text{ мин}^{-1}$ , повторить измерения.
7. Выключить установку.
8. Установить второй опытный канал и провести повторные испытания по пп. 3–7.
9. Вычислить значения расхода и скорости воздуха, коэффициентов потерь. Записать их в таблицу.

10. Построить график зависимости  $\zeta$  от скорости воздуха в канале.

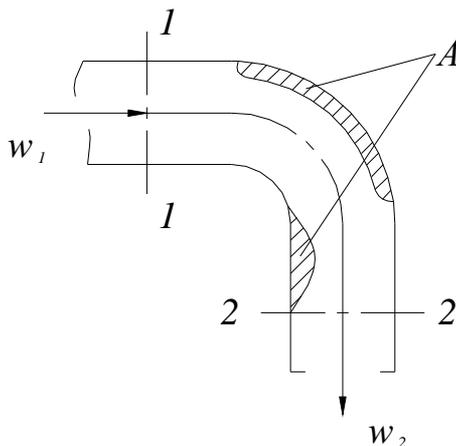


Рис. 6.1. Схема течения газа в колене:  
А – зоны отрыва потока

### Расчетные формулы

1. Плотность воздуха

$$\rho = \frac{p_o}{R \cdot T_o}$$

2. Расход воздуха

$$M_{сек} = \frac{V_o \cdot \rho}{t}$$

3. Средняя скорость потока в сечении

$$w = \frac{M_{сек}}{\rho f_k \cdot 10^{-6}}$$

где  $f_k$  – площадь поперечного сечения канала, мм.

Таблица 6.1

Результаты определения коэффициента потерь канала. "Температура окружающей среды  $T_0=$  К,  
 атмосферное давление  $p_0=$  Па.

№ замера	Форма канала	Показания тахометра $n$ , мин <sup>-1</sup>	Давление, Па		Плотность воздуха $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Площадь сечения канала, мм <sup>2</sup>	Расход воздуха			Средняя скорость, м/с		Коэффициент потерь $\zeta$
			$p_1^*$	$p_2^*$			Показание счетчика $V_0$ , м <sup>3</sup> /с	Время замера $t_0$ , с	Массовый расход воздуха $M_{сек}$ , кг/с	$w_1$	$w_2$	
1												
2												
3												
4												

Окончание табл. 6.1

5												
6												
7												
8												
9												
10												

## 6. Коэффициент местных потерь

$$z = \frac{p_1^* - p_2^*}{r \cdot w^2 / 2}$$

### Контрольные вопросы

1. Что называется коэффициентом потерь канала?
2. Как определяются коэффициенты потерь для несжимаемого газа?
3. Чем измеряется давление заторможенного потока?
4. Как изменяется скорость потока несжимаемого газа в сечении 2–2 канала?
5. Как зависит коэффициент потерь от скорости потока воздуха в канале?

### Содержание отчета

1. Дать краткое описание порядка выполнения работы.
2. Начертить схему экспериментальной установки.
3. Привести основные расчетные формулы и таблицу результатов испытаний.
4. Построить графики зависимости коэффициента потерь от скорости потока воздуха для исследованных каналов.

## Лабораторная работа №7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ

#### Общие сведения

Качество смесеобразования в дизелях с непосредственным впрыском топлива во многом зависит от интенсивности воздушного вихря в цилиндре, создаваемого впускным каналом. В дизелях применяют тангенциальные или винтовые каналы. Путем изменения геометрии канала получают вращательное движение требуемой интенсивности. Энергия воздушного потока в цилиндре при неизменных конструктивных параметрах впускной системы зависит от расхода воздуха и высоты подъема клапана.

Количественно интенсивность вращательного движения оценивается по величине кинетической энергии и угловой скорости воздуха в цилиндре.

В среднем заряд в цилиндре вращается по закону, характерному для вращения твердого тела. При этом тангенциальная скорость воздуха находится в прямо пропорциональной зависимости от расстояния элемента заряда до оси цилиндра  $\frac{W_t}{r} = const$ . На расстоянии 2..5 мм от стенок цилиндра происходит отклонение скорости движения от закона твердого тела и появляются дополнительные потоки вследствие трения между потоками и стенками цилиндра.

Цель работы – определение кинетической энергии и угловой скорости воздуха в цилиндре при различных значениях расхода воздуха и высоты подъема клапана.

#### Экспериментальная установка

Установка для проведения испытаний показана на рис. 7.1. Она состоит из вакуумного насоса 1, ротационного газового счетчика 2, гильзы цилиндра 3, головки цилиндра 4, спрямляющей решетки 5, микрометрического винта 6, пьезометра 7. Подъем клапана изменя-

ется при повороте микрометрического винта, установленного сверху на его стержень.

Расход воздуха измеряется с помощью ротационного газового счетчика. Потеря давления на впуске – водяным пьезометром.

Гильза изготовлена из прозрачного оргстекла. В ней на высоте, соответствующей положению поршня в нижней мертвой точке, расположена спрямляющая решетка, которая удерживается от поворота пружиной. В решетке происходит преобразование энергии вращательного движения воздушного потока в энергию осевого движения (рис. 7.2). В результате решетка поворачивается, раскручивая пружину. Значение момента, действующего на решетку, определяется по углу поворота решетки.

### Расчетные формулы

При расчете энергии вихря принимается, что воздушный поток в цилиндре вращается как твердое тело вокруг неподвижной оси и скорости потока равномерно распределены в поперечном сечении цилиндра.

Кинетическая энергия твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, определяется по формуле

$$E = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2,$$

где  $I$  – момент инерции вращающегося тела, кг·м<sup>2</sup>;

$\omega$  – угловая скорость, с<sup>-1</sup>.

Момент инерции вращающегося воздушного потока

$$I = m \frac{R^2 + r^2}{2},$$

где  $m$  – масса воздуха, вращающегося в цилиндре, кг;

$R$  – наружный радиус решетки, м;

$r$  – внутренний радиус решетки, м.

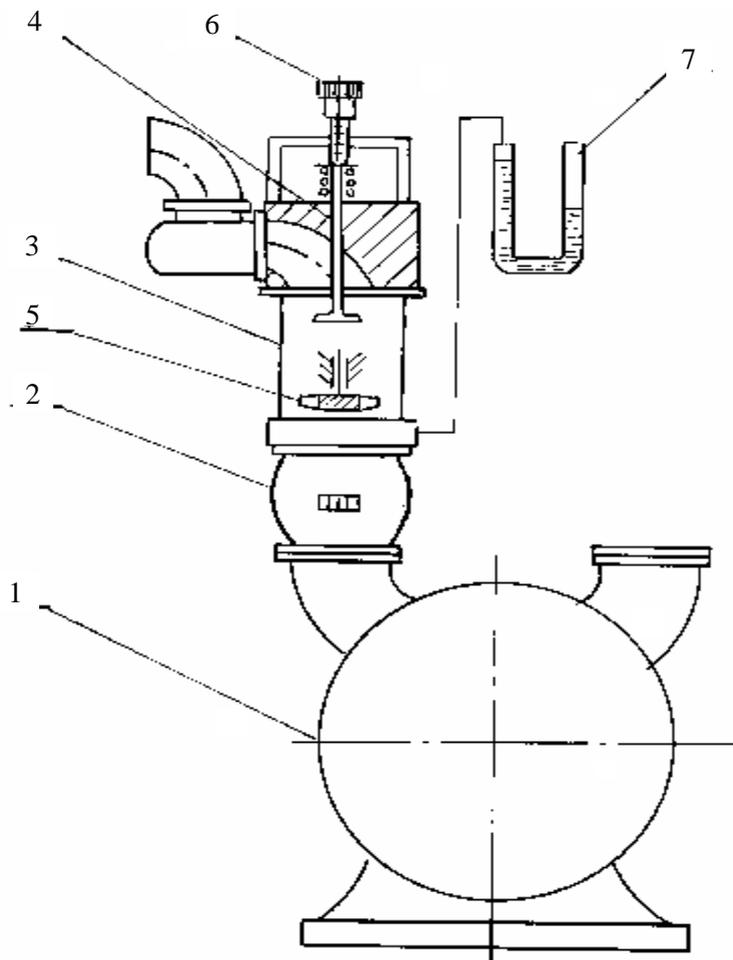


Рис. 7.1. Схема экспериментальной установки для исследования движения воздуха в цилиндре дизеля

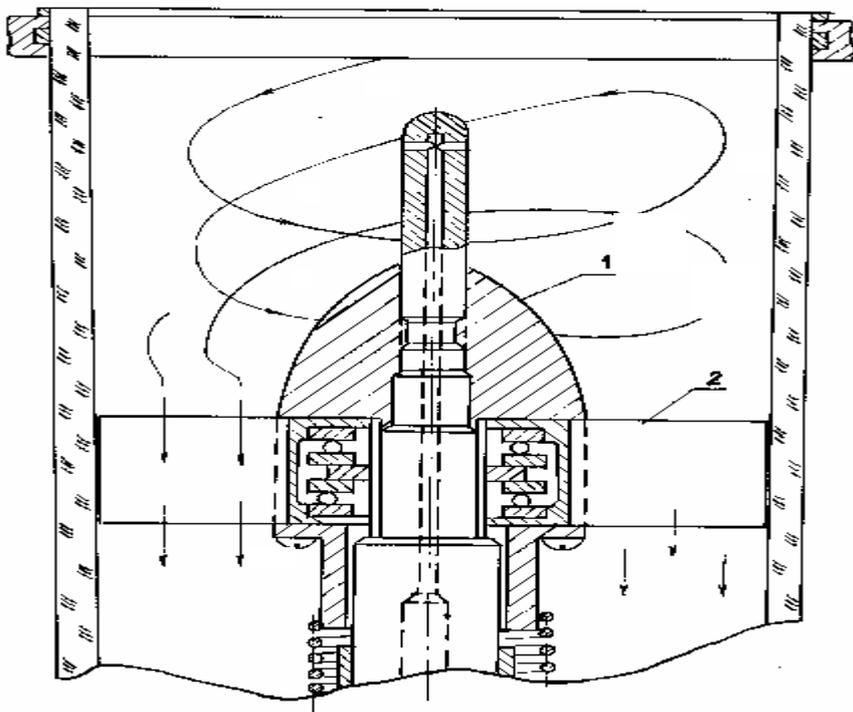


Рис. 7.2. Схема движения газового потока в цилиндре:  
1 – обтекатель; 2 – спрямляющая решетка

Угловая скорость  $\omega$  определяется из уравнения момента количества движения (вторая теорема Эйлера), которое для спрямляющей решетки имеет вид

$$M_{кр} = M_{сек} \cdot r_{ср} \cdot \omega_t,$$

где  $M_{кр}$  – момент, действующий на решетку, Н·м;

$M_{сек}$  – массовый расход воздуха, кг/с;

$r_{ср}$  – средний радиус решетки, м;

$w_t$  – тангенциальная составляющая абсолютной скорости воздуха на входе в решетку на радиусе  $r_{cp}$ , м/с.

С учетом соотношения  $\omega = \frac{w_t}{r_{cp}}$  находим угловую скорость по уравнению

$$\omega = \frac{M_{кр}}{M_{сек} \cdot r_{cp}^2}.$$

### Порядок выполнения работы

1. Заготовить таблицу результатов экспериментов по приведенной форме (табл. 7.1).
2. Запустить вакуумный насос.
3. Установить по пьезометру перепад давления  $\Delta p = 3000..4000$  Па и поддерживать его постоянным.
4. Замерить расход воздуха и момент, действующий на решетку. Результаты замеров записать в таблицу.
5. Изменяя подъем клапана на заданную величину, повторить действия по пп. 3 и 4.
6. Выключить установку.
7. Подсчитать значения  $\omega$  и  $E$  для различных подъемов клапана.
8. Построить график зависимости угловой скорости вращения и энергии воздушного потока от величины подъема клапана (рис. 7.3).

### Контрольные вопросы

1. С какой целью в цилиндре дизеля создается организованное движение воздушного заряда?
2. По каким параметрам оценивается интенсивность воздушного вихря в цилиндре дизеля?
3. Как формулируется теорема Эйлера о моменте количества движения?
4. Как измеряется момент количества движения воздушного потока в цилиндре дизеля?

5. По каким формулам определяется угловая скорость вращения и кинетическая энергия воздушного потока?

#### Содержание отчета

1. Дать краткое описание порядка выполнения работы.
2. Начертить схему экспериментальной установки.
3. Привести основные расчетные формулы и таблицу результатов испытаний.
4. Начертить график зависимости угловой скорости и кинетической энергии воздушного потока от величины подъема клапана и дать его анализ.

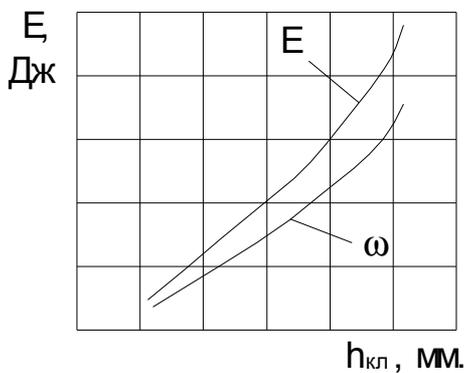


Рис. 7.3. Зависимость угловой скорости и кинетической энергии воздушного потока от высоты подъема клапана

Таблица 7.1

Результаты исследования движения воздуха в цилиндре дизеля  
(температура окружающей среды  $T_0 = \dots K$ ; атмосферное давление  $p_0 = \dots Pa$ )

№ замера	Высота подъема клапана $h_{кл}$ , мм	Показания тахометра $n$ , мин <sup>-1</sup>	Момент на спрямляющей решетке $M_{кр}$ , Н·м	Массовый расход воздуха $M_{сек}$ , кг/с	Угловая скорость заряда $\omega$ , с <sup>-1</sup>	Кинетическая энергия заряда $E$ , Дж	Примечание
1	2						
2	4						
3	6						
4	8						
5	10						
6	12						

## Лабораторная работа №8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВПУСКНОГО ТРАКТА ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ

#### Общие сведения

Одним из методов исследования впускного тракта двигателей является метод электрогидродинамических аналогий (ЭГДА). Он основан на аналогии, существующей между плоским потенциальным течением жидкости и распределением тока в плоском проводнике: электрический потенциал  $V$  аналогичен потенциалу скорости  $\varphi$ , удельная плотность электрического тока аналогична скорости течения. При соблюдении геометрического подобия областей течения электрического тока и жидкости, а также подобия граничных условий в обеих областях течения эквипотенциальные линии в электрическом поле  $V(x,y)=const$  будут соответствовать эквипотенциальным линиям в потоке жидкости  $\varphi(x,y)=const$ , а силовые линии в электрическом поле – линиям тока в жидкости.

Графическое дифференцирование линий равного потенциала или линий тока позволяет определить скорость течения жидкости. Пользуясь уравнением Бернулли, можно определить соответствующие давления.

Для исследования потенциального течения используются модели, в которых в качестве электропроводного материала применяется бумага с графитовым покрытием. Значения потенциалов точек  $\varphi=const$  отсчитываются в процентах от разности потенциалов шин, принятой за 100 %.

Измерительная цепь содержит градуированный потенциометр  $R$ , составляющий два плеча, и гальванометр  $\Gamma$  – индикатор равновесия моста. Другие два плеча моста составляют модель задачи. Модель соединяется с источником питания с помощью двух шин (электродов) из красной меди  $Ш_1$  и  $Ш_2$  (рис. 8.1).

Прикасаясь шупом  $Щ$  к модели, мы подаем на него электрический потенциал данной модели.

При исследовании методом ЭГДА течения газа по впускному тракту двигателя считают, что он несжимаемый, течение газа является потенциальным и происходит без теплообмена. Область течения газа с одной стороны ограничивается дугой, расположенной у входа во всасывающий канал, с другой – положением днища поршня. У входа в канал поток считается невозмущенным. Скорость потока у поршня постоянная и равна скорости поршня. Таким образом, граничными условиями в моделируемом потоке являются:

постоянное значение потенциала скорости на входе в канал и у поверхности днища поршня;

ограничение движения потока стенками канала, т.е.  $d\varphi/dn=0$ .

Задавая на потенциометре различные значения электрического потенциала  $V$ , с помощью щупа находят на модели точки, принадлежащие линиям равного потенциала. В этих точках ток в цепи щупа равен нулю, и стрелка гальванометра не отклоняется. В этом состоит "аналогия А", позволяющая построить эквипотенциальные линии.

В силу взаимной ортогональности функции тока  $\psi$  и потенциала  $\varphi$  можно так моделировать течение на установке ЭГДА, чтобы линии электрического потенциала соответствовали линиям тока в жидкости. Для этого на исследуемый участок модели наклеивается электропроводным клеем модель сечения обтекаемого тела, вырезанная из материала, имеющего высокую электропроводность. Шины размещаются по сторонам модели вдоль потока. Построив с помощью щупа эквипотенциальные линии электрического поля, получим линии тока в потоке жидкости. Этот способ получил название "аналогия В".

#### Учебный объект

Модели впускного тракта двигателя, вырезанные из электропроводной бумаги и наклеенные неэлектропроводным клеем на планшет, представлены на рис. 8.1. На одной модели должен быть вырезан участок электропроводной бумаги, соответствующий профилю впускного канала, на другой – наклеен электропроводным клеем профиль впускного канала, изготовленный из латунной фольги.

На модели должна быть нанесена масштабная сетка размером 5x5 мм.

### Содержание работы

1. Вычертить на миллиметровой бумаге модель впускного тракта, соответствующую модели, наклеенной на планшет.

2. Установить на модели с вырезанным впускным клапаном шины перпендикулярно вектору скорости и собрать измерительную схему так, как показано на рис. 8.1, а.

3. Последовательно устанавливать подвижный контакт К в положения, соответствующие 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 и 0,9 полного сопротивления потенциометра.

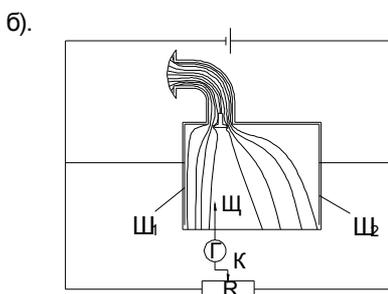
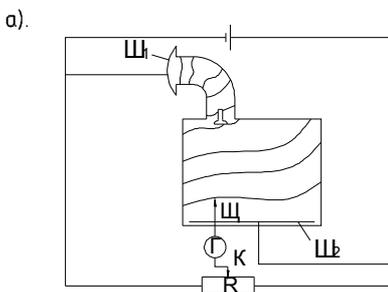


Рис. 8.1. Схема измерительной цепи

4. Для каждого положения контакта потенциометра с помощью шупа определить на модели точки, принадлежащие линиям равного потенциала (в этих точках стрелка гальванометра не отклоняется).

5. Полученные точки перенести на модель, вычерченную на миллиметровой бумаге, и соединить соответствующие точки плавными кривыми. Эти кривые представляют собой семейство эквипотенциальных линий ("аналогия А").

6. Установить на модели с наклеенным клапаном электропроводные шины по контуру впускного тракта и собрать схему так, как показано на рис. 8.1, б.

7. Выполнить операции по пп. 3, 4 и 5. Полученные кривые представляют собой линии тока ("аналогия В").

8. Определить среднюю скорость течения газа в указанных преподавателем точках по формуле

$$w = \frac{\Delta j}{\Delta S} \cdot \frac{\Delta S_o}{\Delta j_o} w_o,$$

где  $w_o$  – скорость поршня (задается преподавателем);

$\Delta j_o, Dj$  – шаг, с которым проведены эквипотенциальные линии у поршня и в окрестностях заданной точки;

$\Delta S_o$  – длина отрезка линии тока, заключенного между двумя эквипотенциальными линиями, расположенными у поршня;

$\Delta S$  – длина отрезка линии тока, заключенного между эквипотенциальной линией  $j = \text{const}$  и соседней эквипотенциальной линией  $j + Dj = \text{const}$ , между которыми находится заданная точка.

#### Контрольные вопросы

1. На чем основан метод электрогидродинамической аналогии?
2. Какие делаются допущения при исследовании течения газа по впускному тракту двигателя методом ЭГДА?
3. Для чего в измерительную цепь включен гальванометр?
4. По какой схеме собирается измерительная цепь?
5. Как определяется семейство эквипотенциальных линий?
6. Как определяются линии тока?

7. Как находится скорость течения газа в различных точках впускного тракта?

#### Содержание отчета

1. Дать описание способа исследования течения газа по впускному тракту двигателя методом ЭГДА.
2. Начертить модель движения газа по впускному тракту с эквипотенциальными линиями и линиями тока.
3. Привести результаты определения скорости течения газа в различных точках впускного тракта.
4. Дать анализ полученных результатов исследования.

## Лабораторная работа №9

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ПЕРЕД ФРОНТОМ РАДИАТОРА

#### Общие сведения

Элементы поверхности радиатора обтекаются воздушным потоком, который не заполняет одинаково всю фронтальную поверхность радиатора. Одна часть фронта обдувается со скоростями больше расчетной, другая – со скоростями, меньше расчетной или совсем не обдувается, или даже имеет обратное направление потока. В этих условиях эффективность работы радиатора оказывается ниже той, которая могла быть достигнута при равномерном распределении воздушного потока.

Неравномерность воздушного потока обуславливается конструктивными и эксплуатационными факторами.

К конструктивным факторам можно отнести наличие и расположение различных элементов перед и за радиатором, форму кожуха вентилятора, взаимное расположение вентилятора и радиатора и ряд других. К числу эксплуатационных факторов можно отнести скорость движения транспортного средства, частоту вращения вентилятора, направление и скорость ветра.

Обеспечение равномерности распределения воздушного потока позволяет сократить габариты и вес радиатора, что ведет к экономии дефицитных металлов и денежных средств.

Цель работы – ознакомление с конструкцией стенда для аэродинамических исследований радиатора и экспериментальное определение распределения воздушного потока перед фронтом радиатора.

#### Экспериментальная установка

Стенд для аэрогидродинамических исследований радиаторов представляет собой упрощенную аэродинамическую трубу (рис. 9.1).

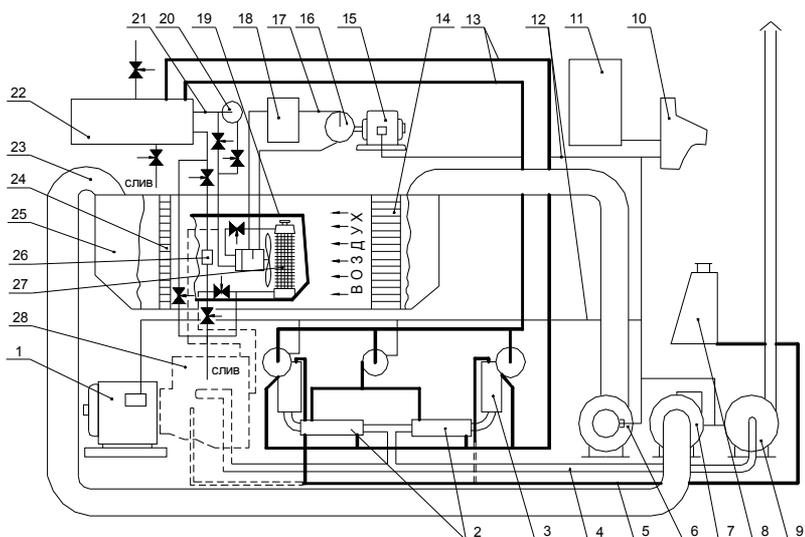


Рис. 9.1. Экспериментальная установка:

- |  |   |
|--|---|
| 1 – балансирующая машина;                      | 17 – трубопроводы высокого и низкого давления подачи масла;             |
| 2 – теплообменник;                             | 18 – маслобак;  |
| 3 – жидкостный подогреватель ПЖД-600;          | 19 – капот;   |
| 4 – коллектор отвода отработавших газов;       | 20 – насос для поддержания постоянного давления охлаждающей жидкости;   |
| 5 – топливопровод;                             | 21 – трубопроводы подачи и отвода жидкости в исследуемый теплообменник; |
| 6 – нагнетательный вентилятор;                 | 22 – резервуар для охлаждающей жидкости;                                |
| 7 – вытяжной вентилятор;                       | 23 – воздушные короба;  |
| 8 – топливный бак;                             | 24 – выходной спрямляющий аппарат воздушного коридора;                  |
| 9 – вытяжной вентилятор-дымосос;               | 25 – воздушный коридор;   |
| 10 – пульт управления;                         | 26 – датчик расхода жидкости;   |
| 11 – силовой шкаф;                             | 27 – радиатор;  |
| 12 – линии питания электроэнергией;            | 28 – двигатель внутреннего сгорания                                     |
| 13 – контур нагрева охлаждающей жидкости;      |   |
| 14 – направляющий аппарат воздушного коридора; |   |
| 15 – двигатель постоянного тока;               |   |
| 16 – шестеренчатый масляный насос;             |   |

Конструкция стенда включает в себя основные элементы систем:

- аэродинамики;

- жидкостного тракта;
- питания топливом;
- теплоснабжения;
- удаления отработавших газов;
- гидравлического привода;
- электроснабжение;
- приборного обеспечения исследований и контроля за работой систем стенда.

Система для исследований аэродинамики включает воздушный коридор 25 с направляющим 14 и спрямляющим 24 аппаратами, подающим 6 и вытяжным 7 вентиляторами и воздушными коробками 23, а также воздушный тракт исследуемого теплообменника.

Система исследований жидкостного тракта теплообменника содержит резервуар охлаждающей жидкости 22, радиатор 27, трубопроводы 13, 21, соединяющие резервуар с системой разогрева 2 и 3 и с системой регулирования температуры охлаждающей жидкости.

Система для создания и поддержания рабочей температуры охлаждающей жидкости состоит из двух жидкостных подогревателей ПЖД – 600 3 и двух теплообменников 2, использующих теплоту отработавших газов, а также полноразмерного двигателя 28 для имитации динамики тепловыделения, когда этого требуют условия испытаний.

Система питания топливом обеспечивает работу подогревателей и двигателя и состоит из топливного бака 8 и подводящих топливопроводов 5.

Вытяжной вентилятор 9 и коллектор 4 составляют систему удаления отработавших газов.

Система гидравлического привода предназначена для передачи энергии агрегатам с гидромеханическим приводом; она состоит из бака 18, шестеренчатого насоса 16, приводимого агрегата и трубопроводов высокого и низкого давления подачи масла 17.

Система энергоснабжения включает всех потребителей электрической энергии стенда: силовой шкаф 11, пульт управления 10, устройство для задания циклов нагружения двигателя, балансирную машину 1, двигатель постоянного тока 15, линии питания электроэнергией 12.

Система приборного обеспечения исследований и контроля за работой систем – это датчики и регистрирующая аппаратура для исследования характеристик движения воздуха и охлаждающей жидкости, приборы для снятия характеристик ДВС, а также контрольно-измерительные приборы систем энергоснабжения.

#### Основные показатели стенда

Поперечное сечение воздушного коридора – 1500x2000 мм.

Длина рабочей части коридора – 3500 мм.

Тепловая производительность – 150 кВт.

Диапазон изменения скорости набегающего потока – 0...15 м/с.

Конструкция стенда позволяет проводить исследования жидкостного и воздушного трактов теплообменника, а также аэродинамики подкапотного пространства.

За основу измерений принят метод локальных измерений воздушного потока. Скорость воздушного потока определяется через динамическое давление воздушного потока (разность полного и статического давления). Для измерений фронт радиатора разбит на 12 участков по вертикали и 10 участков по горизонтали. Размер каждого участка 50x50 мм.

Измерение динамического давления осуществляется трубками полного и статического давлений, установленными на подвижной измерительной планке, с последующей регистрацией тягонапорометрами. Частота вращения вентилятора измеряется частотомером с индукционным датчиком.

#### Содержание работы

1. Подготовить таблицу результатов испытания (табл. 9.1).
2. Включить установку и установить заданный преподавателем режим работы вентилятора.



3. Установить измерительную планку в первое положение и измерить динамический напор на 10-ти горизонтальных участках фронта радиатора. Результаты занести в таблицу.

4. Перемещая измерительную планку последовательно в положения 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, произвести измерения динамического напора на всех участках фронта радиатора. Результаты занести в таблицу.

5. Выключить установку.

6. Построить график распределения скорости воздушного потока перед фронтом радиатора.

#### Расчетные формулы

1. Среднее интегральное значение динамического давления

$$P_{gi\text{cp}} = \frac{1}{120} \sum_{i=1}^{120} P_{gi}, \quad \text{Па},$$

где  $P_{gi}$  – динамическое давление на  $i$ -м участке.

2. Среднее интегральное значение скорости воздуха

$$w_{Lcp} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{gcp}}{\rho}}, \quad \text{м/с}.$$

3. Плотность воздуха, поступающего в сердцевину:

$$\rho_L = \frac{0,464B}{273 + T_L}, \quad \text{кг/м}^3,$$

где  $B$  – барометрическое давление, мм рт. ст.;

$T_L$  – температура воздуха на входе в сердцевину, °С.

4. Скорость воздуха на  $i$ -м участке

$$w_{Li} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{gi}}{\rho}}, \quad \text{м/с.}$$

5. Средний расход воздуха через сердцевину радиатора

$$G_L = w_{Lcp} \cdot F_{жс}, \quad \text{м}^3/\text{с},$$

где  $F_{жс}$  – живое сечение фронтальной поверхности радиатора,  $\text{м}^2$ .

6. Коэффициент неравномерности распределения воздушного потока

$$\delta^2 = \frac{\frac{1}{120} \sum_{i=1}^{120} (P_{gi} - P_{gcp})^2}{P_{gcp}^2}.$$

7. Коэффициент поля

$$j = \frac{w_{Lcp}}{w_{Lmax}}.$$

## Контрольные вопросы

1. Чем обусловлена неравномерность воздушного потока перед фронтом радиатора?
2. Какие системы имеются в стенде для аэродинамических исследований радиатора?
3. Как распределяется скорость воздушного потока перед фронтом радиатора?
4. По какой формуле определяется средний расход воздуха через сердцевину радиатора?
5. Чему равно среднее интегральное значение динамического давления перед фронтом радиатора?

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое описание экспериментальной установки.
3. Порядок проведения работы.
4. Таблица результатов испытаний.
5. График распределения воздушного потока по фронту радиатора.
6. Выводы.

## Литература

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1976.
2. Виноградов Б.С. Прикладная газовая динамика. – М.: Университет дружбы народов им. П. Лумумбы, 1965.

3. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. – М.: Энергия, 1974.
4. К р у г л о в М. Г., М е д н о в А. А. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1988.

П р и л о ж е н и е

Газодинамические функции при  $k=1,4$

$\lambda$	$\tau(\lambda)$	$\pi(\lambda)$	$\varepsilon(\lambda)$	$q(\lambda)$
1	2	3	4	5
0,02	0,9999	0,9998	0,9998	0,0315
0,04	0,9997	0,9990	0,9993	0,0631
0,06	0,9994	0,9979	0,9935	0,0945
0,08	0,9989	0,9963	0,9974	0,1259
0,10	0,9983	0,9942	0,9959	0,1571
0,12	0,9976	0,9916	0,9940	0,1882
0,14	0,9967	0,9886	0,9918	0,2190
0,16	0,9957	0,9851	0,9893	0,2497
0,18	0,9946	0,9812	0,9866	0,2801
0,20	0,9933	0,9768	0,9834	0,3102
0,22	0,9919	0,9720	0,9799	0,3401
0,24	0,9904	0,9668	0,9762	0,3696
0,26	0,9887	0,9611	0,9721	0,3987
0,28	0,9869	0,9550	0,9677	0,4274
0,30	0,9850	0,9485	0,9630	0,4557
0,32	0,9829	0,9415	0,9579	0,4835
0,34	0,9807	0,9342	0,9525	0,5109
0,36	0,9784	0,9265	0,9469	0,5377
0,38	0,9759	0,9183	0,9409	0,5640
0,40	0,9733	0,9097	0,9346	0,5897

0,42	0,9706	0,9008	0,9281	0,6149
0,44	0,9677	0,8915	0,9221	0,6394
0,46	0,9647	0,8819	0,9142	0,6633
0,48	0,9616	0,8719	0,9067	0,6865
0,50	0,9583	0,8616	0,8991	0,7091
0,52	0,9549	0,8509	0,8911	0,7309
0,54	0,9514	0,8400	0,8829	0,7520
0,56	0,9477	0,8287	0,8744	0,7724
0,58	0,9439	0,8172	0,8657	0,7920
0,60	0,9400	0,8053	0,8567	0,8109
0,62	0,9359	0,7932	0,8475	0,8288
0,64	0,9317	0,7808	0,8380	0,8459
0,66	0,9274	0,7681	0,8283	0,8623
0,68	0,9229	0,7553	0,8183	0,8778
0,70	0,9183	0,7422	0,8082	0,8924
0,72	0,9136	0,7289	0,7978	0,9061
0,74	0,9087	0,7154	0,7872	0,9189
0,76	0,9037	0,7017	0,7764	0,9308
0,78	0,8986	0,6878	0,7655	0,9418
0,80	0,8933	0,5738	0,7543	0,9518
0,82	0,8879	0,6597	0,7429	0,9610
0,84	0,8824	0,6454	0,7314	0,9691
0,86	0,8767	0,6310	0,7197	0,9764
0,88	0,8709	0,6165	0,7079	0,9826
0,90	0,8650	0,6019	0,6959	0,9879
0,92	0,8589	0,5873	0,6838	0,9923
0,94	0,8527	0,5726	0,6715	0,9957
0,96	0,8464	0,5579	0,6591	0,9981
0,98	0,8399	0,5431	0,6466	0,9953
1,00	0,8333	0,5283	0,6340	1,0000