

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР**

**КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА**

ИСПЫТАНИЕ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

**Утверждено
редакционно-издательским
советом института
в качестве
методических указаний
к лабораторной работе № 10
для студентов**

УДК 536.2:532.517.4

Излагаются материалы, знакомящие студентов с процессами энергетического разделения в потоке вязкого сжимаемого газа. Рассматриваются принципы работы прямоточной вихревой трубы, охлаждаемой вихревой трубы, самовакуумирующейся вихревой трубы, вихревого вакуум-насоса.

Указания разработаны на кафедре «Теплотехника» КуАИ по дисциплине «Техническая термодинамика» для студентов специальностей 0535, 0537 и ЦНИС.

Составители: А. П. Меркулов, В. В. Бирюк,
В. Т. Шестаков

Рецензенты: д-р техн. наук Ю. А. Кныш,
канд. техн. наук В. В. Бобров

Вихревой эффект энергетического разделения, или эффект Ранка, реализуется в любом потоке вязкого, сжимаемого газа при наличии в нем турбулентной составляющей скорости и градиента статического давления, направленных по нормали к скорости основного движения. Наличие этих условий приводит к перераспределению статической температуры по сечению в соответствии с законом адиабаты: в области повышенного статического давления статическая температура выше, и наоборот.

Очень высокие градиенты статического давления, нормальные к скорости основного движения, имеют место в закрученных потоках газа; здесь наиболее ярко проявляется вихревой эффект.

Вихревым эффектом объясняется снижение температуры воздуха в приосевой области циклонов и смерчей, возникающих в атмосфере.

Вихревой эффект можно создать, если в гладкую цилиндрическую трубу 5, 6 (рис. 1) через тангенциальное сопло 11 вводить сжатый воздух, который образует интенсивный круговой поток. Если прилегающий к сопловому входу конец трубы закрыть диафрагмой 7 с осевым отверстием, то круговой поток будет смещаться в сторону открытого конца трубы и вытекать через него в атмосферу, а в приосевой зоне трубы создастся разрежение, и внутрь трубы через отверстие диафрагмы будет подсасываться воздух из атмосферы.

Установив на открытом конце трубы дроссель 4 и прикрывая его, можно повысить давление внутри трубы так, что через отверстие диафрагмы в атмосферу начнут вытекать элементы кругового потока. На этом режиме четко наблюдается вихревой эффект: вытекающий через отверстие диафрагмы приосевой поток оказывается заметно охлажденным, а вытекающий через дроссель поток — подогретым.

Описанное устройство, в котором реализуется вихревой эффект, называется делителем вихревой трубой, так как она делит поток газа на холодный и горячий.

Получаемый в вихревой трубе эффект охлаждения холодного потока (вытекающего из отверстия диафрагмы) и подогрева горячего потока (вытекающего через дроссель) зависит от давления p_1 и температуры T_1 поступающего в трубу сжатого газа; его физических свойств; от давления p_2 холодного потока; от массовой доли

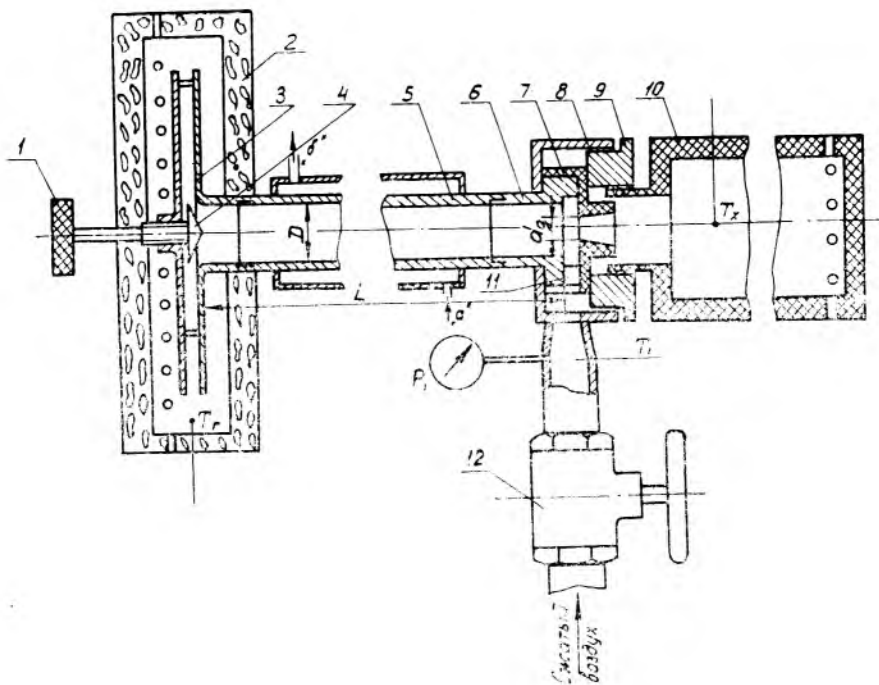


Рис. 1. Схема установки

μ холодного потока, представляющей собой отношение массового расхода m_x холодного потока к общему расходу m_1 подаваемого в вихревую трубу сжатого газа

$$\mu = \frac{m_x}{m_1}, \quad (1)$$

а также от геометрических соотношений вихревой трубы: ее диаметра D , диаметра d_0 отверстия диафрагмы, площади сечения входного сопла и длины L трубы.

Эффект охлаждения холодного потока

$$\Delta T_x = T_1 - T_x, \quad (2)$$

(где T_x — температура холодного потока) возрастает с ростом p_1 , T_1 , L , D и снижается с увеличением p_x , d_0 .

Чем больше прикрыт дроссель, тем больше масса холодного потока (больше его массовая доля μ), но эффект охлаждения с ростом μ вначале резко возрастает, достигает максимума при

$\mu = 0,2 - 0,3$, затем снижается и становится близким к нулю при полностью закрытом дросселе (при $\mu = 1$).

С возрастанием μ растет эффект подогрева горячего потока

$$\Delta T_r = T_r - T_1, \quad (3)$$

где T_r — температура горячего потока.

При μ , близких к единице, ΔT_r резко снижается. Эффект подогрева горячего потока нетрудно подсчитать по эффекту охлаждения холодного потока и его массовой доле μ .

Действительно, если вихревая труба теплоизолирована от окружающей среды, а газовый поток не совершает в ней внешней работы, то весь процесс в вихревой трубе является изоэнтальпным. Из этого условия для 1 кг подаваемого сжатого газа можем записать равенство

$$i_1 = \mu i_x + (1 - \mu) i_r, \quad (4)$$

здесь i_1 , i_x , i_r — удельные энтальпии входящего, холодного и горячего потоков соответственно.

Принимая условие $c_p = \text{const}$ и заменяя $i = c_p T$, получим выражение

$$\mu \Delta T_x = (1 - \mu) \Delta T_r, \quad (5)$$

из которого определяется

$$\Delta T_r = \frac{\mu}{1 - \mu} \Delta T_x, \quad (6)$$

Для оценки эффективности вихревой трубы удобно пользоваться основными безразмерными термодинамическими и геометрическими величинами:

степень расширения газа в вихревой трубе

$$\pi = \frac{p_1}{p_x}; \quad (7)$$

относительная температура холодного потока

$$\Theta_x = \frac{T_x}{T_1}; \quad (8)$$

здесь T_1 и T_x — абсолютные полные температуры K ;
температурная эффективность вихревой трубы

$$\eta = \frac{\Delta T_r}{\Delta T_x}, \quad (9)$$

здесь

$$\Delta T_x = T_1 \left| 1 - \left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right| \quad (10)$$

— эффект охлаждения газа при адиабатном расширении с совершением внешней работы от параметров сжатого газа p_1, T_1 до давления холодного потока p_x ;

$k = \frac{c_p}{c_v}$ — показатель адиабаты.

Относительный диаметр отверстия диафрагмы

$$\bar{d} = \frac{d_0}{D} \quad (11)$$

Относительная площадь сопла

$$\bar{F}_c = \frac{F_c}{F_{тр}} \quad (12)$$

здесь $F_{тр} = \frac{3.14 D^2}{4}$ — площадь сечения трубы.

Относительная длина вихревой зоны трубы

$$\bar{l} = \frac{L}{D} \quad (13)$$

Использование этих величин позволяет получить обобщенные характеристики для вихревых труб различных масштабов, работающих в различных условиях.

Эти характеристики можно использовать для расчета и проектирования вихревых труб, предназначенных для различных целей и условий работы.

Если вместо дросселя на «горячем» конце вихревой трубы установить радиальный щелевой диффузор \mathcal{Z} (см. рис. 1), при прохождении через который круговой поток резко снижает свою окружную и радиальную скорость, преобразуя кинетическую энергию в энергию давления, то в вихревой трубе возникает заметный вакуум, и воздух из атмосферы интенсивно засасывается через отверстие диафрагмы.

Такое сочетание вихревой трубы с диффузором представляет собой вихревой вакуум-насос, успешно используемый для вакуумирования замкнутых объемов, он сможет создавать вакуум до $0,9 \cdot 10^5$ Па, т. е. до абсолютного давления $0,1 \cdot 10^5$ Па.

Вихревую трубу с диффузором называют самовакумирующейся вихревой трубой. Чем меньше отверстие диафрагмы, тем больший вакуум создается в приосевой зоне самовакумирующейся вихревой трубы. Если полностью закрыть отверстие диафрагмы, то в приосевой зоне установится наибольший вакуум.

В самовакумирующейся вихревой трубе также имеет место вихревой эффект энергетического разделения, и приосевые слои закрученного потока оказываются охлажденными.

Так как вихревой эффект охлаждения зависит от степени расширения газа (следует закону адиабаты), то приосевые слои ох-

лажены до очень низкой температуры, что можно зарегистрировать, поместив в присевую зону трубы термомпару.

Такую конструкцию вихревой трубы с успехом используют для охлаждения цилиндрических тел, помещаемых в присевую зону.

Вихревая труба с отверстием в диафрагме и дросселем на горячем конце (делящая вихревая труба) может обеспечивать охлаждение всего поступающего в нее сжатого газа на режиме полностью закрытого дросселя при $\mu = 1$.

Для этого необходимо только интенсивно охлаждать извне стенки вихревой трубы, например, водопроводной водой.

Такая вихревая труба называется охлаждаемой.

Кроме случаев получения холодного газа, охлаждаемая вихревая труба с успехом используется в качестве образцового расхода газа.

Принцип такого использования основан на том, что, проходя через вихревую трубу, газ не совершает внешней работы, а только отдает тепло охлаждающей воде. Зная расход охлаждающей воды и изменение температуры ее при теплообмене с газом, а также теплоемкость газа, из уравнения теплового баланса можно определить с высокой точностью искомый расход газа.

В лабораторных работах с вихревой трубой ставится задача исследования основных характеристик делящей, охлаждаемой, самовакuumирующей вихревых труб и вихревого вакуум-насоса.

З а д а н и е 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЛЯЩЕЙ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

Цель работы: экспериментально найти зависимость эффекта охлаждения от массовой доли и степени расширения вихревой трубы.

Порядок выполнения работы

Для проведения этой работы вихревая труба имеет максимальную длину, на отверстие диафрагмы навинчен ресивер 10, в котором измеряется температура T_x холодного потока, дроссель открыт. Сосуд Дьюара, в котором помещены компенсационные спай термомпар, наполнен тающим льдом.

Необходимо подготовить протокол записи и обработки результатов экспериментов по таблице.

Открытием входного вентиля 12 сжатый воздух подается в вихревую трубу, по манометру устанавливается требуемое давление:

$$p_{1и} = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 \text{ МПа,}$$

Таблица

№ изме- рения	$p_{1и}, \text{МПа}$	$p_{г}, \text{МПа}$	T_1		T_x		$T_г$		ΔT_x К	$\Delta T_г$ К	μ	η	π	$\mu\eta$	Θ_x	$q,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
			mV	К	mV	К	mV	К								

Дроссель 4 на горячем конце вихревой трубы с помощью ручки 1 прикрывается до появления расхода холодного потока через ресивер 10.

Температура T_x холодного потока регистрируется термопарой и потенциометром.

Температура $T_г$ горячего потока регистрируется термопарой, установленной в глушителе 2. Температура T_1 подаваемого к сопловому входу сжатого газа регистрируется термопарой, установленной во входном патрубке перед соплом.

После некоторой выдержки записываются показания потенциометра для ЭДС термопар T_1 , T_x , $T_г$ и показания манометра $p_{1и}$. Переход на следующий по μ режим при неизменном $p_{1и}$ производится прикрытием дросселя, и после выдержки снова регистрируются значения ЭДС термопар T_1 , T_x , $T_г$.

Время выдержки на заданном режиме определяется стабилизацией показаний потенциометра по T_x и $T_г$. Следует учитывать, что при малых μ наибольшей инерционностью обладает термопара T_x , а при больших μ — термопара $T_г$.

При проведении экспериментов желательно цилиндрическую часть вихревой трубы теплоизолировать от окружающей среды, что особенно важно на режимах больших μ , когда стенки трубы приобретают высокую температуру.

После снятия характеристик по μ на одном давлении $p_{1и}$ входным вентилем устанавливается другое давление ($p_{1и} = 0,3 \text{ МПа}$), и замеры повторяются от открытого дросселя ($\mu \approx 0$) до почти полностью закрытого ($\mu = 1$).

Обработка результатов эксперимента

По замеренным ЭДС термопар и таблице ЭДС хромель-копелевой термопары определяются температуры T_1 , T_x , $T_г$ с учетом поправки на температуру холодных спаев.

По барометрическому давлению B определяются значения абсолютного давления сжатого воздуха

$$p_1 = p_{1u} + B, \text{ МПа.} \quad (14)$$

Подсчитываются значения ΔT_x и ΔT_r по выражениям (2) и (3). Массовая доля μ холодного потока может быть определена по выражению (6) :

$$\mu = \frac{\Delta T_r}{\Delta T_r + \Delta T_x} = \frac{T_r - T_1}{T_r - T_x}. \quad (15)$$

По выражению (7) подсчитывается степень расширения газа в вихревой трубе.

Так как холодный поток вытекает в окружающую среду, то принимается

$$p_x = B, \text{ МПа.}$$

Из выражения (8) по значениям абсолютных температур T_1 и T_x определяются значения Θ_x для каждого p_1 , по выражению (10) подсчитываются значения ΔT_s , а затем по (9) определяются значения η для каждого μ .

Термодинамическая эффективность вихревой трубы обычно оценивается ее адиабатным КПД, представляющим собой произведение температурной эффективности на массовую долю холодного потока

$$\eta_{ад} = \mu \eta. \quad (17)$$

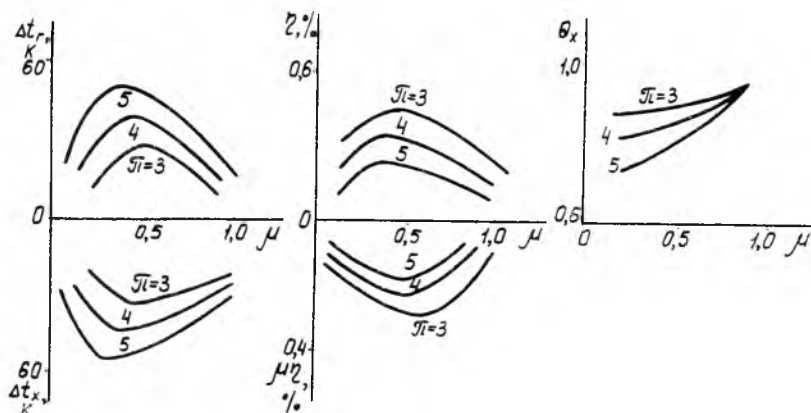


Рис. 2. Характеристики делящей вихревой трубы

Также важно знать удельную холодопроизводительность вихревой трубы, выражающую собой количество тепла, отобранного от холодного потока, отнесенного к 1 кг поступающего сжатого газа

$$q = \mu c_p \Delta T_x. \quad (18)$$

Все результаты расчетов заносятся в протокол, а затем строятся графики по форме ΔT_r ; $\Delta T_x = f_1(\mu, \pi)$; η ; $\mu \eta = f_2(\mu, \pi)$; $\Theta = f_3(\mu, \pi)$ (рис. 2).

Содержание отчета

1. Схема и описание вихревой трубы.
2. Протокол измерений и расчетов.
3. Графики зависимостей.

Задание 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ОХЛАЖДАЕМОЙ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

Цель работы: найти экспериментально зависимость эффекта охлаждения при работе вихревой трубы на $\mu = 1$ от степени расширения и температуры охлаждающей жидкости.

Порядок выполнения работы

Для проведения этой работы вихревая труба имеет максимальную длину. В охлаждающую рубашку через штуцер «а» подается охлаждающая вода, а через штуцер «б» — отводится. На отверстие диафрагмы навинчен ресивер 10, в котором измеряется температура T_x холодного потока; дроссель 4 закрыт. Температура воды на входе $T_{вх}$ и на выходе $T_{вых}$ замеряется с помощью хромель-копелевых термомпар.

Необходимо заготовить протокол записи и обработки результатов эксперимента по таблице.

Таблица

$p_{из.}$, МПа	p_1 , МПа	T_1		T_2		$T_{вх}$		$\Delta T_{с\text{вых}}$		ΔT_x , К	π	$\gamma_{гад}$ $\mu \eta$	Θ_x	$\Theta_{п}$	q $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
		mV	K	mV	K	mV	K	m	K						

Открытием входного вентиля 12 сжатый воздух подается в вихревую трубу, по манометру устанавливается требуемое давление

$$p_{1и} = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6, \text{ МПа.}$$

С помощью потенциометра измеряются ЭДС термопар E_{T_1} , E_{T_x} , $E_{T_{вх}}$, $E_{T_{вых}}$. Замеры проводятся при 3-х различных расходах охлаждающей воды. Затем устанавливается новое давление $p_{1и}$ и снова регистрируется ЭДС термопар. Затем изменяется расход охлаждающей жидкости и измерения повторяются снова. На каждом давлении расход охлаждающей жидкости меняется 3 раза. Последний режим снимается при манометрическом давлении 0,6 МПа.

Обработка результатов эксперимента

Определяется абсолютное давление сжатого воздуха перед вихревой трубой по формуле (14). Подсчитывается степень расширения в вихревой трубе по формуле (7).

По замеренным ЭДС термопар и таблице определяются температуры T_1 , T_x , $T_{вх}$, $T_{вых}$. Затем определяется значение эффекта охлаждения по выражению (2). По выражению (10) определяются значения адиабатных эффектов охлаждения Δt_s , а по формуле (9) — значение температурной эффективности. Так как в охлаждаемой вихревой трубе охлаждается весь поток ($\mu = 1$), то температурная эффективность в этом случае равна адиабатному КПД вихревой трубы.

Подогрев воды определится

$$\Delta T_{в} = T_{вых} - T_{вх}, \text{ К.} \quad (18,а)$$

Расход охлаждающей воды определится из условия, что жидкость нагревается только за счет передачи тепла от горячей части вихревой трубы.

Расход сжатого воздуха определится

$$m_1 = F_c \frac{0,04 p_1}{\sqrt{T_1}} 10^6 \text{ кг/с.} \quad (18,б)$$

Здесь $F_c = 15 \cdot 10^{-6}$, м² — площадь проходного сечения сопла вихревой трубы;

T_1 , К — абсолютная температура сжатого воздуха;

p_1 , МПа — абсолютное давление сжатого воздуха.

Затем подсчитываем удельную холодопроизводительность q по выражению (18). Найдим Θ_x по выражению (8) и приведенную температуру охлаждающей жидкости

$$\Theta_{в} = \frac{T_{вх} + T_{вых}}{2 T_1}. \quad (18,в)$$

Все результаты расчетов заносятся в протокол, а затем строятся графики по формуле $\Theta_x = f_1(\Theta_b, \pi)$; $\eta = f_2(\Theta_b, \pi)$ (рис. 3).

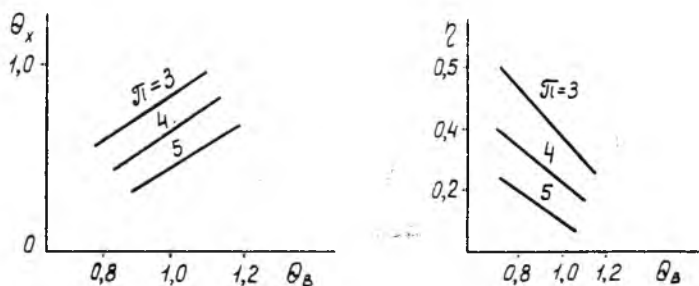


Рис. 3. Характеристики охлаждаемой вихревой трубы

Содержание отчета

1. Схема и описание охлаждаемой вихревой трубы.
2. Протокол измерений и расчетов.
3. Графики зависимостей.

З а д а н и е 3

ИССЛЕДОВАНИЕ САМОВАКУУМИРУЮЩЕЙСЯ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

Цель работы: изучить зависимость эффекта охлаждения в приосевой зоне от степени расширения в самовакуумирующей вихревой трубе.

Порядок выполнения работы

Для проведения этой работы цилиндрическая часть 5 (см. рис. 1) вихревой трубы демонтируется, а щелевой раскруточный диффузор 3 навинчивается непосредственно на начальный 6 (сопловой) участок, дроссель 4 полностью открывается.

Затем снимается ресивер 10 холодного потока, и в отверстие диафрагмы 7 плотно устанавливается коническая пробка с приемником давления и хромель-копелевой термопарой, встроенной в приемник давления так, что спай термопары и срез приемника давления размещается на оси соплового сечения вихревой трубы и измеряет давление и температуру потока в этой области.

Необходимо заготовить протокол записи и обработки результатов экспериментов по таблице.

№ изме- рения	p_{1u} МПа	p_1 МПа	T_1		T_x		ΔT_x К	ΔT_s К	π	η	Δp_{oc} МПа	π^*
			mV	К	mV	К						

Вентилем подачи сжатого воздуха устанавливается заданное давление p_{1u} перед соплом вихревой трубы.

С помощью потенциометра измеряются ЭДС термопар E_{T1} и E_{T2} и давление Δp_{oc} по вакуумметру. Далее устанавливается новое давление p_{1u} и снова регистрируются ЭДС термопар и давление Δp_{oc} . Для первого режима следует установить давление $p_{1u} = 0,15$ МПа, для каждого следующего режима увеличивать давление на 0,05 МПа. Последний режим снимается при манометрическом давлении 0,6 МПа.

Обработка результатов эксперимента

Определяется абсолютное давление сжатого воздуха перед вихревой трубой

$$p_1 = p_1 + B, \text{ МПа.} \quad (19)$$

Определяется давление на оси вихря

$$p_{oc} = B - \Delta p_{oc}, \text{ МПа.} \quad (19,a)$$

Воздух из диффузора вытекает в окружающую среду, имеющую барометрическое давление B , поэтому степень расширения в вихревой трубе определяется

$$\pi = \frac{p_1}{B}. \quad (20)$$

Степень расширения в вихре будет $\pi^* = \frac{p_1}{p_{oc}}$.

По замеренным ЭДС термопар в таблице ЭДС хромель-копелевой термопары определяются температуры T_1 и T_x .

По выражению (2) подсчитываются значения эффектов охлаждения ΔT_x .

По выражению (10) определяются значения адиабатных эффектов охлаждения ΔT_x , по выражению (9) — значения температурной эффективности η , по выражению (8) — значения Θ_x .

Строятся графики зависимостей

$$\eta = \varphi_1(\pi) \text{ и } \Delta T_x = \varphi_2(\pi); \Theta_x = \varphi_3(\pi); \\ p_x = \varphi_4(\pi); \pi^* = \varphi_5(\pi), \text{ (рис. 4).}$$

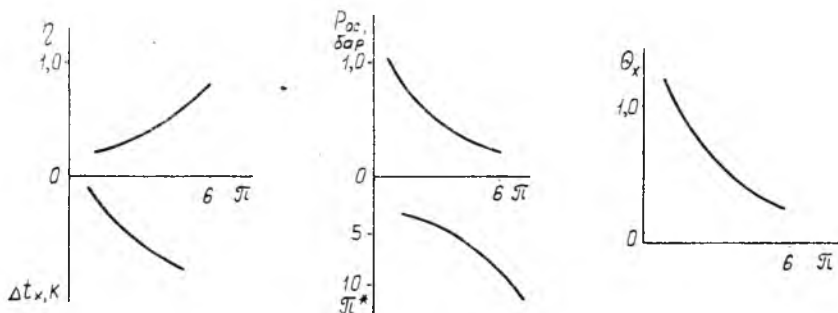


Рис. 4. Характеристики самовакумирующейся вихревой трубы

Содержание отчета

1. Схема и краткое описание вихревой трубы.
2. Протокол записи и обработки результатов измерений.
3. Графики полученных зависимостей.

Задание 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ВАКУУМ-НАСОСА

Цель работы: изучить зависимость создаваемого вихревым вакуум-насосом вакуума от давления питающего сжатого воздуха, определить зависимость коэффициента эжекции от степени сжатия.

Струйные аппараты широко используются в технике в качестве компрессоров, вентиляторов и вакуум-насосов. Примерами тому могут служить паровые эжекторы для подачи воды в котлы, пароэжекторные компрессоры холодильных установок, вакуум-эжекторы конденсаторов паротурбинных установок.

Это объясняется компактностью, высокой производительностью и надежностью струйных аппаратов.

Одним из недостатков прямолинейных аппаратов является их высокая чувствительность к отклонению от расчетного режима, иначе говоря, их однорежимность. Вторым недостатком является

ограниченная степень сжатия, создаваемая ими, не превышающая 10.

Вихревой вакуум-насос лишен этих недостатков и может обеспечить на порядок большие степени сжатия и высокую эффективность в широком диапазоне режимов работы.

Это объясняется тем, что в круговом потоке окружную скорость газа, распространяющегося на все меньший радиус, можно довести до близкой к максимальной скорости и теоретически получить какое угодно низкое давление на оси потока.

Вихревой вакуум-насос, в сущности, представляет собой самовакуумирующуюся вихревую трубу.

Если к вихревому вакуум-наосу подается сжатый газ с абсолютным давлением p_1 , температурой T_1 и секундным массовым расходом m_1 , а из диффузора газ вытекает в окружающую среду с барометрическим давлением B , то степень расширения подаваемого сжатого (активного) газа в вихревом вакуум-насосе определяется по выражению (20):

$$\pi = \frac{p_1}{B}.$$

Если отверстие диафрагмы соединено с вакуумируемой магистралью, абсолютное давление в которой p , температура T , то пассивный газ из магистрали засасывается в вихревой вакуум-насос, сжимается в диффузоре до атмосферного давления и выбрасывается вместе с активным газом из диффузора в атмосферу.

Степень сжатия пассивного газа определяется отношением

$$\pi_n = B / p. \quad (21)$$

Эта величина является одной из основных характеристик вихревого вакуум-насоса.

Второй важной характеристикой является коэффициент эжекции n , представляющий собой отношение секундного массового расхода m пассивного газа к секундному массовому расходу активного газа m_1 :

$$n = m / m_1. \quad (22)$$

Величины π , π_n , n полностью характеризуют вакуум-насос и позволяют провести его расчет для различных случаев применения.

Порядок выполнения работы

• Для проведения работы цилиндрическая часть 5 (см. рис. 1) вихревой трубы демонтируется, и диффузор 3 с полностью откры-

тым дросселем 4 навинчивается непосредственно на начальный (сопловый) 6 участок вихревой трубы.

К отверстию диафрагмы через гайку 9 подсоединяется шланг большого сечения от вакуумируемой емкости, имеющей измеренный объем $V = 50 \div 100$ литров.

Вакуумируемая емкость снабжена пробковым краном (или конусной пробкой) с большим проходным сечением, через который емкость может сообщаться с окружающей средой.

Давление в емкости измеряется вакуумметром или ртутным пьезометром, имеющим высоту столба около 800 мм.

Температура воздуха в емкости контролируется хромель-копелевой термопарой.

Перед измерениями необходимо заготовить протокол записи результатов измерений и расчетов по таблице.

Таблица

№ изме- рения	p_{1u} МПа	p_1 МПа	T_1		T		τ с	Δp мм рт. ст.	p МПа	λ	$\lambda_{п}$	m_1 кг/с	m кг/с	n
			mV	K	mV	K								

Перед началом испытаний кран емкости полностью открывается.

Открытием входного вентиля в вихревой вакуум-насос подается сжатый воздух и устанавливается заданное давление

$$p_{1u} = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 \text{ МПа.}$$

После стабилизации давления p в емкости записывается начальное значение Δp , мм рт. ст. и температура T , K , затем одновременно закрывается полностью пробковый кран емкости и включается секундомер.

Через каждые 10 секунд измеряется (без выключения секундомера) перепад давления Δp в емкости.

Измерение заканчивается после установления постоянного вакуума в емкости.

В процессе этих замеров 2—3 раза измеряется температура газа в емкости (она незначительно отличается от температуры окружающей среды).

Для перехода на новый режим необходимо открыть кран емкости, а затем вентилем установить новое давление p_{1u} сжатого воздуха перед вихревым вакуум-насосом.

Снова закрывается кран емкости и одновременно включается секундомер и повторяются измерения перепада давления через каждые 10 секунд.

Обработка результатов эксперимента

По полученным значениям p_{1u} и Δp подсчитываются значения абсолютных давлений сжатого воздуха перед вакуум-насосом

$$p_1 = p_{1u} + B, \text{ МПа} \quad (23)$$

и текущего давления в емкости

$$p = B - \Delta p, \text{ МПа}. \quad (24)$$

Определяется степень расширения активного газа в вихревом вакуум-насосе

$$\pi = p_1 / B. \quad (25)$$

Текущая степень сжатия пассивного газа подсчитывается по выражению

$$\pi_n = B / p. \quad (26)$$

Секундный массовый расход сжатого воздуха (активного газа) через вихревой вакуум-насос определяется по газодинамическому выражению для расхода газа через сопло сечением F_c при критическом истечении

$$m_1 = F_c = \frac{0,04 p_1}{\sqrt{T}} 10^6, \text{ кг/с}, \quad (27)$$

где $F_c = 15 \cdot 10^{-6}$, м² — площадь проходного сечения сопла исследуемого вакуум-насоса;

T_1, K — абсолютная температура сжатого воздуха;

$p_1, \text{ МПа}$ — абсолютное давление сжатого воздуха перед соплом.

При вакуумировании замкнутого объема V массовый секундный расход m отсасываемого газа является существенно переменным по времени, изменяясь от максимального в первый момент от начала вакуумирования до нулевого значения при достижении предельного вакуума в объеме.

Поэтому коэффициент эжекции n (выражение 22) также меняется от максимального значения до нуля.

Значение массового секундного расхода в данный момент времени τ , при котором в емкости V имеется давление p и температура T , может быть определено из уравнения состояния следующим образом.

В данный момент времени масса газа в объеме V составит

$$M = \frac{pV}{RT} \cdot 10^6. \quad (28)$$

Здесь $R = 287$, Дж/кг·град — газовая постоянная для воздуха.

Продифференцируем это выражение по времени

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{V \cdot 10^6}{RT} \cdot \frac{dp}{d\tau}. \quad (29)$$

Но производная $\frac{dM}{d\tau}$ и выражает собой секундный массовый расход на емкости

$$m = \frac{V \cdot 10^6}{RT} \cdot \frac{dp}{d\tau}. \quad (30)$$

Принятое здесь условие $T = \text{const}$ вполне обосновывается высокой теплоемкостью стенок вакуумируемой емкости и интенсивным теплообменом газа через стенки с окружающей средой.

Измерение температуры T в процессе эксперимента подтверждает справедливость этого условия.

Коэффициент эжекции n в данный момент времени теперь можно выразить так

$$n = \frac{m}{m_1} = \frac{V \cdot 10^6}{m_1 RT} \cdot \frac{dp}{d\tau}. \quad (31)$$

Величина $\frac{dp}{d\tau}$ находится из результатов опытов.

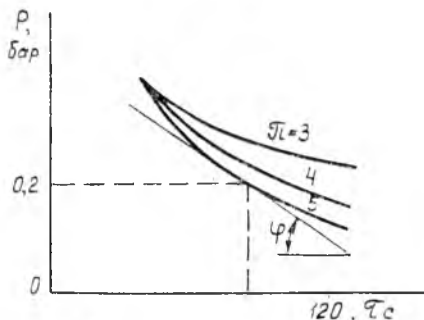


Рис. 5. Характеристики вихревого вакуум-насоса

По полученным значениям $p = j(\tau)$ строится кривая (рис. 5).

В любой точке этой кривой при данном значении p тангенс угла наклона касательной к оси абсцисс соответствует значению

$$\frac{dp}{d\tau} = \operatorname{tg} \varphi.$$

Таким образом, по одной экспериментальной кривой $p = j(\tau)$ можно определить зна-

чения коэффициента эжекции вихревого вакуум-насоса для любого давления вакуумируемой среды в диапазоне измерения давлений.

Если при работе вакуум-насоса открыть кран емкости так, чтобы установилось стационарное давление p , то коэффициент эжекции на этом режиме будет равен найденному по выражению (31) с помощью опытной кривой $p = f(\tau)$.

Полученные кривые $p = f(\tau)$ для различных p_1 (или π) дают возможность рассчитать вихревой вакуум-насос для самых различных случаев применения.

Содержание отчета

1. Схема и краткое описание установки.
2. Протокол записи результатов опыта и обработки данных.
3. Графики зависимостей $p = f(\tau, \pi)$.

Составители: *Александр Петрович Меркулов,*
Владимир Васильевич Бирюк,
Валентин Тимофеевич Шестаков

ИСПЫТАНИЕ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

Редактор О. Б. Хнырева
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор В. В. Петрова

Сдано в набор 17.12.87 г. Подписано в печать 9.03.87 г.
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.
Гарнитура литературная. Печать высокая.
Усл. п. л. 1,2. Уч.-изд. л. 1,0. Т. 600 экз.
Заказ 1251. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С. П. Королева.
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.