

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

2-е издание, переработанное и дополненное

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний*

САМАРА
Издательство СГАУ
2008

Рецензент В. Н. Матвеев

Составители: *В.Н. Белозерцев, В.В. Бирюк, А.И. Довгялло,
С.В. Крашенинников, А.А. Копотев,
А.Д. Клемина, А.П. Толстоногов*

Лабораторный практикум по курсу технической термодинамики: метод. указания / *В.Н. Белозерцев, В.В. Бирюк, А.И. Довгялло, С.В. Крашенинников, А.А. Копотев, А.Д. Клемина, А.П. Толстоногов.* – 2-е изд., перераб. и доп. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. – 56 с.

В предлагаемом цикле лабораторных работ описаны конструкции лабораторных установок, изложены методики проведения экспериментов и обработки их результатов по разделам: законы идеального газа, политропные процессы, термодинамика газовых потоков, реальные газы.

Предназначен для студентов, обучающихся по специальностям аэрокосмического профиля.

Содержание

Лабораторная работа №1. Определение изобарной теплоёмкости воздуха	5
Лабораторная работа №2. Определение параметров газа при втекании его в резервуар.....	13
Лабораторная работа №3. Исследование процесса истечения воздуха через суживающееся сопло	22
Лабораторная работа №4. Определение коэффициента расхода микросопла нестационарным методом	30
Лабораторная работа №5. Определение среднего значения показателя политропы и работы процесса сжатия	37
Лабораторная работа № 6. Изохорический процесс для воды и водяного пара.....	47

Общие сведения

Настоящие методические указания отражают развитие учебно-методического комплекса на кафедре теплотехники и тепловых двигателей с момента ее основания до наших дней

Учебный лабораторный практикум был разработан основателями кафедры: профессорами В.П. Лукачевым, А.П. Меркуловым, В.И. Метениным; доцентами Н.Н. Огородниковым, Н.Д. Кольшевым.

В современном издании отражены изменения, связанные с модернизацией измерительной аппаратуры и с методологией обработки экспериментальных данных.

Лабораторная работа №1

Определение изобарной теплоёмкости воздуха

Цель работы: определение методом калориметрирования теплоёмкости воздуха при постоянном давлении.

Задания:

1. Найти значение изобарной теплоёмкости воздуха.
2. Составить отчёт по выполненной лабораторной работе.

В теплотехнике наиболее важен расчёт количества тепла. Чтобы произвести его, необходимо знать значения удельных теплоёмкостей.

Удельной теплоёмкостью, или просто теплоёмкостью, называется количества тепла, которое необходимо сообщить телу (газу), чтобы температура какой-либо количественной единицы (кг, м³, кмоль и т.д.) его в данном процессе изменилась на 1 K.

Теплоёмкость газов зависит от условий протекания процесса подвода или отвода тепла от газа. Действительно, если 1 кг газа, находящегося в цилиндре с подвижным поршнем, проходит через ряд процессов изменения состояния и при этом в каждом процессе температура изменяется на 1 K при различном увеличении его объёма (совершённая газом работа), то количество тепла, затраченного на каждый из процессов (это и есть теплоёмкость газа), будет разным.

В соответствии с этим различают теплоёмкость при постоянном объёме C_v и теплоёмкость при постоянном давлении C_p .

Результаты опытных и теоретических исследований показывают, что теплоёмкость газа в данном процессе изменения его состояния зависит от параметров состояния, т. е. $C=f(P, T)$.

Теплоёмкость идеальных газов не зависит от давления; для этих газов $C=f(T)$. Вместе с тем в приближённых расчётах, особенно в небольшом интервале температур (250-400 K), часто пренебрегают и зависимостью теплоёмкости от температуры; в этом случае считают $C - const$.

Рассматривая теплоёмкость как величину, зависящую от параметров состояния ($C \neq const$), необходимо для определения понятия теплоёмкости исследовать бесконечно малое изменение температуры dT .

При этом и количество тепла dq , подведённое к телу (газу), будет также бесконечно малым.

В таком случае, согласно ранее данному определению теплоёмкости, получаем

$$C = dq / dT \quad (1)$$

Эта теплоёмкость называется истинной, Дж/К. Истинная теплоёмкость 1кг вещества в общем случае определяется соотношением

$$C_x = (dq / dT)_x, \quad (2)$$

где индекс x характеризует условия, при которых производится сообщение тепла исследуемому веществу или отнятие тепла от вещества.

Каждое вещество обладает бесчисленным количеством числовых значений теплоёмкости, что непосредственно следует из аналитического выражения первого начала термодинамики

$$dq = du + pdv, \quad (3)$$

где dq зависит от условий, при которых совершается процесс, следовательно, и теплоёмкость является функцией процесса.

Для практических целей большое значение имеет значение теплоёмкостей C_v и C_p . В этом случае уравнение (2) для C_v и C_p можно записать в виде

$$C_p = (dq / dT)_p \text{ и } C_v = (dq / dT)_v \quad (4)$$

Уравнение (4) по существу является только формальным выражением теплоёмкости, в них и проявляется зависимость теплоёмкости от основных термодинамических параметров состояния.

Опираясь на фундаментальные соотношения, вытекающие из первого закона термодинамики, можно получить развёрнутые выражения, устанавливающие связь C_v и C_p с основными термодинамическими параметрами состояния, а также их взаимную связь.

Широкое использование полученных аналитических зависимостей было бы возможно при условии, что для всех веществ (или отдельно для каждого вещества) известна точная аналитическая форма уравнения состояния:

$$F(p;v;T)=0.$$

Однако, детальные физические исследования показывают, что знание точного уравнения состояния реальных газов прежде всего опирается на точность знания о конкретном атомно-молекулярном строении газов. Поэтому непрерывно ведутся теоретические и экспериментальные исследования, направленные на уточнение уравнения состояния реальных газов.

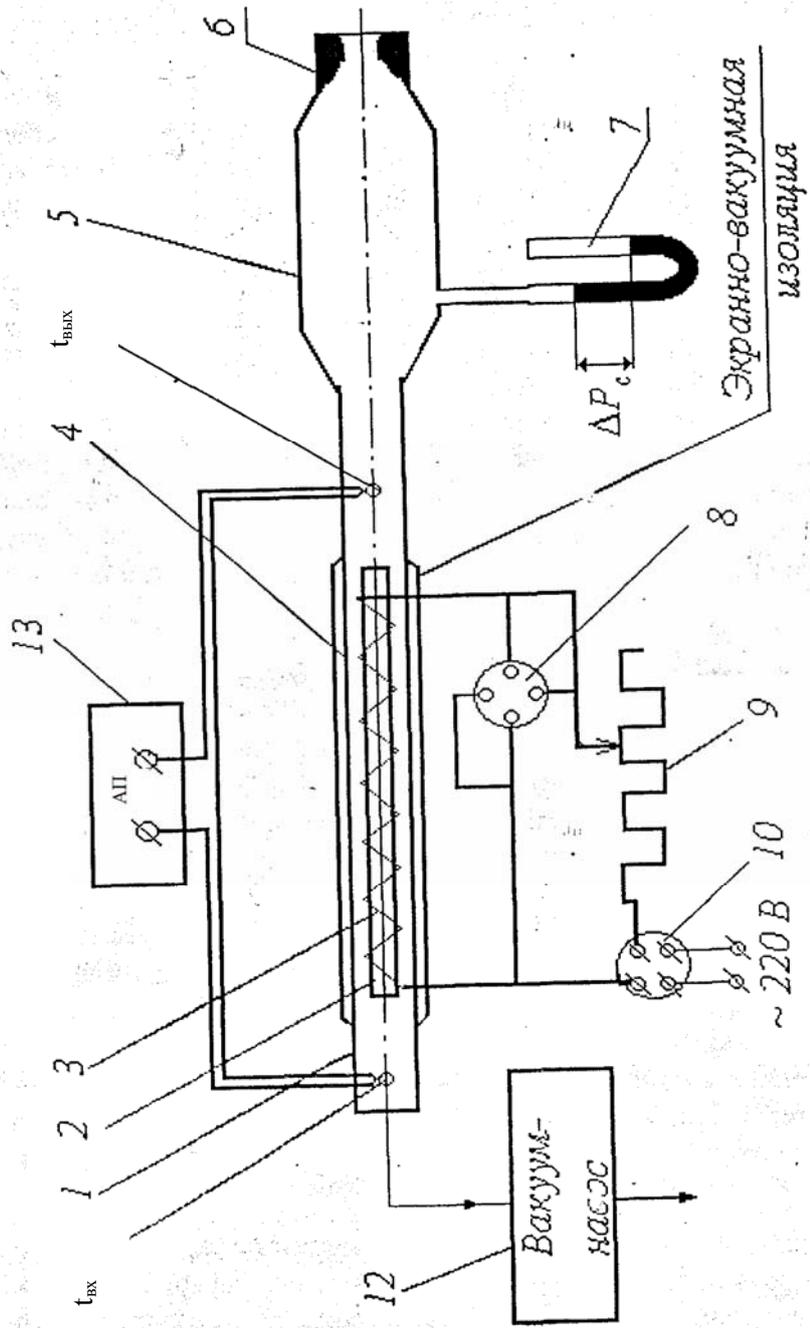


Рисунок 1. - Принципиальная схема электрокалориметра

Знание точных значений C_v и C_p для различных веществ исключительно важно, например, для расчётов тепловых процессов газотурбинных, реактивных двигателей и специальных технологических процессов, протекающих в условиях высоких давлений и температур газов.

В настоящее время значения C_v и C_p для различных веществ определяются экспериментально. Точное определение C_v и C_p связано со значительными трудностями (особенно при высоких давлениях и температурах). Для определения C_p газов наиболее совершенным является спектроскопический метод, основанный на применении квантовой физики. В предлагаемой лабораторной работе значение C_p для воздуха определяется методом проточного калориметрирования при температурах, близких к температуре окружающей среды, и является удельной величиной с размерностью c_p , Дж/кг·К.

Описание лабораторной установки

Значение C_p определяется методом калориметрирования. Принципиальная схема приведена на рис. 1. Установка состоит из стеклянного проточного калориметра 1, внутри которого на крестовине 2 из стеклотекстолита помещается нихромовая спираль 3, служащая для подогрева проходящего воздуха. Для тепловой изоляции от окружающей среды калориметр окружён стеклянной оболочкой 4 с посеребрённой поверхностью. Для уменьшения потери тепла в окружающую среду воздух из пространства между калориметром и оболочкой удалён.

Температура входящего потока воздуха измеряется хромель-копелевой термопарой $t_{вх}$ (первый канал измерителя «ОВЕН»), а температура выходящего потока - хромель-копелевой термопарой $t_{вых}$ (второй канал измерителя).

При работе вакуум-насоса 12 в его всасывающей трубке создаётся разрежение, под действием которого атмосферный воздух движется через установку. Количество проходящего воздуха пропорционально перепаду ΔP_c водяного столба на пьезометре 7, перепад создаётся мерным соплом 6, установленным на входе в ресивер 5.

В электрокалориметре воздух нагревается от электроспирали и затем выбрасывается вакуумнасосом в атмосферу.

В установке, кроме перечисленных приборов, используется также ваттметр переменного тока 8 (класса 0,2), стабилизатор напряжения, реостат 9, автотрансформатор 10 (ЛАТР-11), барометр и термометр для измерения параметров атмосферного воздуха.

Основная погрешность показаний не превышает $\pm 1\%$ области измерений прибора.

Порядок выполнения работы

Перед началом работы необходимо включить вакуум-насос. С помощью автотрансформатора и реостата следует отрегулировать мощность электрического тока, подаваемого на спираль, и установить показания ваттметра 10...20 Вт. Далее установка продувается до полной стабилизации температуры на выходе.

После установления теплового равновесия необходимо произвести измерения температуры $t_{\text{вых}}$ и давления P окружающего воздуха и записать показания ваттметра W , Вт, пьезометра ΔP_c , мм вод. ст.

Выключается установка в следующем порядке: ручка автотрансформатора устанавливается в нулевое положение; автотрансформатор отключается от электрической сети; с целью охлаждения установка продувается воздухом в течение минуты; выключается вакуум-насос.

Определение c_p производится по уравнению баланса тепла. Тепло, выделенное нагреваемой спиралью, поглощается воздухом.

Обработка результатов эксперимента

Тепло, поглощаемое воздухом

$$Q = mc_p \Delta T = W \quad (5)$$

Из уравнения (5) получим формулу для определения C_p :

$$c_p = W / m\Delta T \quad (6)$$

где m - массовый расход воздуха через электрокалориметр, кг/с.

Величина m подсчитывается по формуле:

$$m = m_0 \sqrt{\rho / \rho_0} = m_0 \sqrt{\frac{PT_0}{P_0 T}},$$

где $m_0 = f(\Delta P_c)$ - расход воздуха через сопло, кг/с, соответствующий нормальным техническим условиям ($P_0=1,013 \cdot 10^5$ Па, $T_0=293$ К), определяется по тарировочному графику, приведённому на рис. 2 (систематическая ошибка измерения при этом не превышает 1.0%); $\rho_0 = P_0 / RT_0$ - плотность воздуха при нормальных технических условиях, кг/м³.

$$\rho = P / RT,$$

где ρ - плотность воздуха перед электрокалориметром, кг/м³;
 P - показания барометра, Па;
 $R = 287$ - газовая постоянная воздуха, Дж/кг·К;
 T - абсолютная температура воздуха перед калориметром, К.

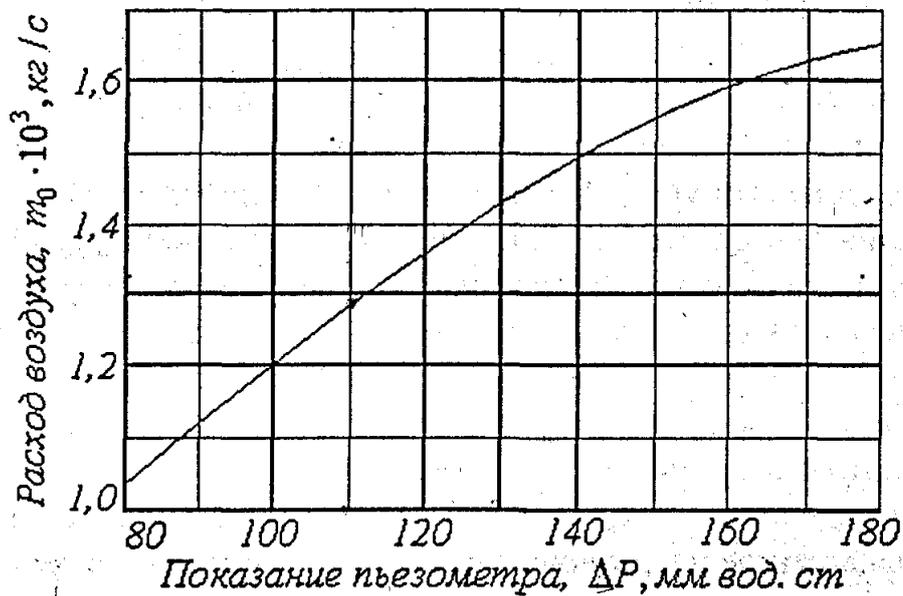


Рисунок 2 - Тарировочный график расходомерного сопла

Определяется перепад температур на входе $t_{вх}$ и на выходе $t_{вых}$ воздуха калориметра

$$\Delta T = t_{вх} - t_{вых} \quad (7)$$

Расчёт изобарной теплоёмкости C_p производится по формуле (6) на основании осреднённых значений W , m , ΔT . Для оценки точности экспериментальных данных используется табличное значение изобарной теплоёмкости воздуха:

$$c_{p \text{ табл}} = 1005 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$$

(в интервале температур $T=0..60^\circ\text{C}$). Рассчитывается относительная погрешность определения теплоемкости.

$$\Delta C_p = \frac{C_{p(\text{эксн})} - C_{p(\text{табл})}}{C_{p(\text{табл})}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

которая включает в себя систематическую ошибку (погрешность приборов), случайную (недостаточно строгое поддержание режима, неточности при отсчёте показаний приборов и др.), а также неучтенные тепловые потери из калориметра в окружающую среду.

Тепловые потери из калориметра в окружающую среду имеют место, хотя их величина и незначительна вследствие ряда мер, принятых для их уменьшения, и малого изменения температуры в опыте. Погрешность приборов, особенно погрешность измерения расхода, значительно перекрывает погрешность, связанную с пренебрежением тепловыми потерями.

Содержание отчёта

1. Краткое описание методики проведения опыта.
2. Принципиальная схема установки.
3. Протокол записи показаний измерительных приборов.
4. Обработанные результаты опыта.
5. Расчёт ошибки измерения.

Контрольные вопросы

1. Что называется удельной теплоёмкостью?
2. Какие параметры и как влияют на теплоёмкость газов?
3. Что называется истинной теплоёмкостью?

4. Что называется средней теплоёмкостью?
5. Какова размерность массовой удельной теплоёмкости?
6. Объясните схему лабораторной установки. Что играет роль теплоизоляции в калориметре?
7. Объясните порядок выполнения работы.
8. Объясните формулы, используемые для обработки результатов эксперимента, физическую сущность входящих в них величин, их размерность.

Протокол записи измерений

Номер режима	W, Вт	P _{возд} , Па	ΔP_c , мм вод. Ст.	T, °C	T _к , °C	ΔT , °C	m ₀ , г/с	m, г/с	c _p , Дж/кг·К	Δc_p , %
1										
2										
3										
4										
5										
Среднее значение	-	-	-	-	-	-	-	-		

Список используемых источников

1. Кирилин В. А. , Сычев В. В. , Щейндлин А. Е. Техническая термодинамика. - М.: Энергия, 1983, с.215 - 220.
2. Мухачев Г. А. , Шукин Б. К. Термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1991.

Лабораторная работа №2

Определение параметров газа при втекании его в резервуар

Цель работы - ознакомление с термодинамическими основами процесса смешения газов при наполнении резервуара.

Работой предусматривается:

экспериментальное исследование изменения температуры газа при втекании его в резервуар;

определение теоретической закономерности изменения температуры смеси однородных газов в наполненном резервуаре в зависимости от начального давления в нем;

построение ожидаемого (теоретического) и фактического графиков зависимости относительного изменения температуры воздуха от относительного изменения давления в резервуаре;

вычисление для заданного случая массы воздуха, поступившего в резервуар.

Теоретические основы эксперимента

В рассматриваемом процессе смешения газов при наполнении резервуара постоянного объема V , содержащего массу газа m_1 с известными параметрами состояния p_1, T_1, v_1 вводится некоторое количество m_2 того же газа с параметрами p_2, T_2, v_2 .

Теоретическое и экспериментальное исследование такого процесса имеет большое практическое значение, так как позволяет определить параметры состояния смеси. Зная их, можно отыскать важные характеристики процесса - массу газа, заполнившего резервуар, текущие параметры рабочего тела в наполняемой емкости, определяющие, в свою очередь, динамику процесса наполнения, а значит, и технологию наполнения.

Теоретическое решение задачи - определение температуры смеси газов - возможно на основе приложения первого начала термодинамики к исследованию типичного нестационарного процесса.

Для решения задачи воспользуемся аналитическим выражением первого начала термодинамики $Q=AU+L$. Тогда исследуемый объект

должен быть представлен в виде термодинамической системы (рис. 1), которая удовлетворяет двум обязательным требованиям:

- а) установлены границы системы;
- б) через границу термодинамической системы масса не переносится.

Количество тепла и работы, передаваемой через границы, контролируется, а сами границы в рассматриваемом процессе подвижны (полностью или частично). Для рассматриваемого случая это может быть резервуар из воображаемого мягкого непроницаемого материала, не имеющего массы и упругости (рис. 1 а), или жесткий цилиндр с подвижным поршнем (рис. 1 б).

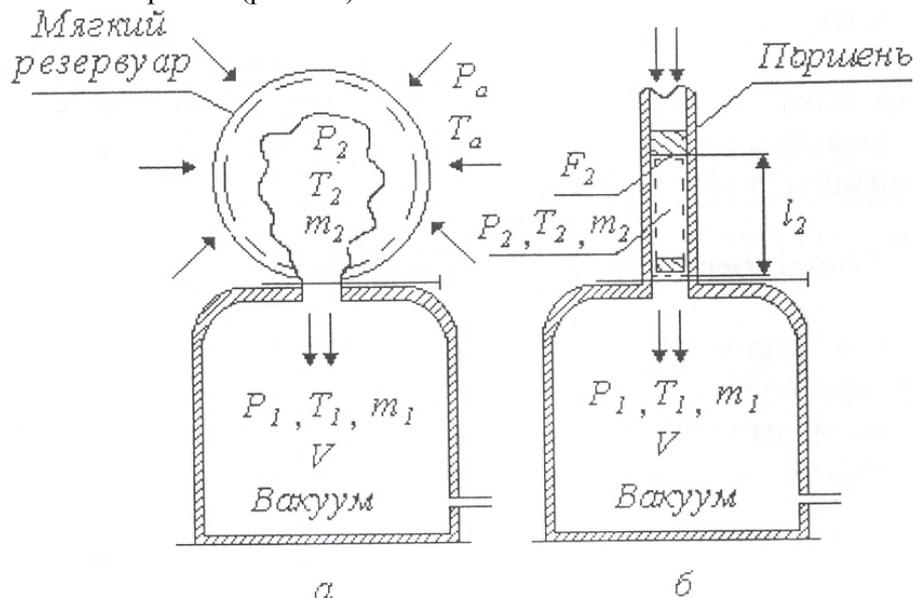


Рисунок 1 - Термодинамическая система процесса

Объем «мешка» или цилиндра равен такому объему газа, который в последующем опыте будет введен внутрь резервуара. Задача осложняется тем, что объем втекающего газа заранее неизвестен. Примем в основу расчетов термодинамическую систему по схеме (рис 1 б). Здесь, в цилиндре длиной l_2 перемещается поршень с площадью F_2 . Перемещение поршня за некоторый промежуток времени на расстоянии l_2 обеспечивает втекание газа до тех пор, пока давление p_1 в резервуаре не станет равным p_2 . Процесс смешения газов в резервуаре протекает быстро, поэтому задача решается в предположении, что теплообмен

между газом и внутренними поверхностями резервуара отсутствует. Таким образом, установка может рассматриваться как неравновесная адиабатическая термодинамическая система.

К приведенным замечаниям следует добавить, что передачу энергии в форме механической работы, совершаемой внешней средой, в данном случае можно рассматривать как процесс с малой степенью необратимости.

Действительно, в начальной стадии втекания воображаемый поршень движется с малыми скоростями, поэтому можно считать, что внешнее атмосферное давление p_a на поверхности поршня (внешняя граница системы) и внутреннее давление газа p_2 под поршнем практически равны друг другу. В заключительной фазе процесса давление в резервуаре увеличивается, скорость втекания газа уменьшается, и скорость перемещения поршня замедляется, что тоже обеспечивает равенство $p_2 = p_a$, т. е. в течение всего процесса статическое давление под поршнем сохраняется равным атмосферному и, следовательно, интересующая нас работа может быть определена как работа изобарного процесса, выражаемая отрицательной величиной, так как объем системы уменьшается:

$$-L_2 = F_2 l_2 p_2 m_2 = v_2 p_2 m_2 . \quad (1)$$

В связи с тем, что объем резервуара постоянный, газ, втекающий в него, внешней работы не совершает. Ее можно рассматривать как работу, производимую над газом, содержащимся в резервуаре до смешения:

$$-L_2 = L.$$

В адиабатном процессе работа может быть получена только за счет уменьшения внутренней энергии системы:

$$L = (u_1 m_1 + u_2 m_2) - um . \quad (2)$$

Здесь u_1 , u_2 и u - внутренняя энергия газа соответственно в резервуаре, под поршнем и после смешения, m - масса газовой смеси равна $(m_1 + m_2)$. Приравнявая правые части уравнений (1) и (2), получим

$$um = u_1 m_1 + (u_2 + p_2 v_2) m_2$$

или

$$um = u_1 m_1 + i_2 m_2 .$$

Откуда

$$u = \frac{u_1 m_1 + i_2 m_2}{m_1 + m_2} . \quad (3)$$

Если известна масса m_2 , то нетрудно определить удельный объем смеси:

$$v = \frac{V}{m_1 + m_2}$$

и с помощью диаграммы состояния или по таблицам определить остальные параметры газовой смеси (p, T, S, h).

Для идеальных газов можно получить соотношение, для расчёта температуры газовой смеси по известным значениям p_1, T_1, p_2 и T_2 , используя известные зависимости:

$$u = c_v T \text{ и } i = c_p T.$$

Из уравнения (3) температура смеси газов равна

$$T = \frac{T_1 m_1 + k T_2 m_2}{m_1 + m_2}, \quad (4)$$

где $k = c_p / c_v$ - показатель адиабаты идеального газа.

Из выражения (4) следует интересный вывод, что при $m_1=0$, когда резервуар, например, откакумирован до очень малых значений p_1 и происходит только втекание газа (без смешения), температура его в конце процесса будет равна

$$T = k T_a, \quad (5)$$

то есть, независимо от давления окружающей среды и размеров резервуара, абсолютная температура газа после втекания должна увеличиться в k раз.

Однако, вследствие того, что подвижная граница термодинамической системы выбрана нами произвольно, величину m_2 определить расчетным путем не представляется возможным, а измерять ее в условиях реальных процессов наполнения резервуаров сложно и нецелесообразно. В связи с этим, удобнее измерять параметры смеси T и p в конце процесса и по их значениям находить m_2 . Выражая величины m_1 и m_2 через параметры состояния по уравнению:

$$m = \frac{pV}{RT}, \quad (6)$$

возможно получить из соотношения (4) выражение для температуры смеси в конце процесса наполнения

$$T = T_1 \frac{k}{1 + (k-1) p_1 / p_a}. \quad (7)$$

Величина подогрева газа, определенная из выражения (7), будет меньше вычисленной по соотношению (5). Физически это объясняется следующим образом: втекающая масса газа разогревается в k раз, но в процессе втекания в резервуаре она смешивается с оставшимся газом, имеющим более низкую температуру; в результате смешения образуется смесь с температурой $T < kT_a$. Оценивая результаты разогрева газа в резервуаре в относительных величинах T/T_1 и p_1/p_2 для воздуха, получим, согласно (7) таблицу:

Таблица

p_1/p_a	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
T/T_a	1,40	1,30	1,205	1,127	1,06	1,0

Следует отметить, что теоретический расчет велся при некоторых упрощающих допущениях, поэтому неизбежны разногласия в расчетных и последующих экспериментальных результатах.

Например, в связи с тем, что температурный эффект подогрева является значительным, в процессе заполнения между газом и стенками резервуара будет иметь место теплообмен и фактический процесс не будет адиабатным, а величина регистрируемого подогрева будет ниже. Учесть количество тепла, переданного газом стенке резервуара, можно на основе весьма сложных аналитических соотношений, что не входит в задачу лабораторной работы.

Описание лабораторной установки

Для реализации процесса наполнения резервуара однородным газом в лабораторных условиях применяется установка, представленная на рисунке 2, в которой воздух из окружающей среды и при её параметрах вытекает в предварительно откакумированный резервуар после открытия впускного крана.

Таким образом, осуществляется рассмотренная выше схема термодинамической системы при давлениях не выше атмосферного.

Установка содержит резервуар 1 объемом $V \approx 30$ литров, соединенный трубопроводом через запорный вентиль 4 с вакуумнасосом 5 и через вентиль 3, либо с мановакуумметром 2.

На горловине резервуара установлен атмосферный кран - нормально закрытый электропневмоклапан 7. Он открывается для

впуска атмосферного воздуха с помощью экспозиметра 6. Экспозиметр необходим для регулировки продолжительности открытого положения крана в пределах от 0,2 до 10 с. Это время установлено при осциллографировании процесса и определяется равенством давлений $p_2 - p_a$ при наполнении.

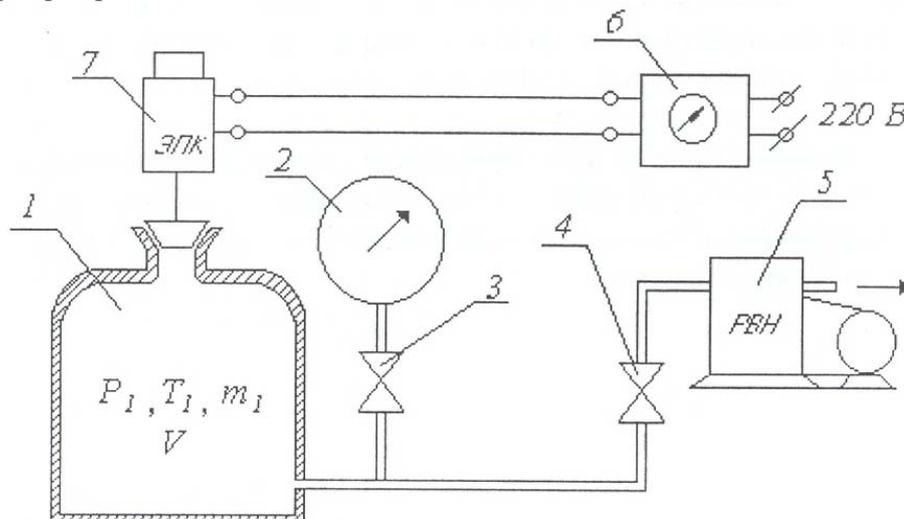


Рисунок 2 - Схема установки

Так как процесс выравнивания давления в резервуаре при открытом клапане 7 протекает очень быстро, применение каких-либо термометрических приборов невозможно из-за их термической инерции. Поэтому для измерения температуры газа в резервуаре в качестве газового термометра используется сама емкость. В этом случае температура определяется косвенно с помощью мановакуумметра 2. Монтаж вентилях трубопроводов и других приборов осуществлен на лабораторном столе. Давление в расчетах применяем абсолютным:

$$P_{абс} = P_a \pm P_{изм} .$$

Порядок выполнения работы

1. Для записи показаний приборов и результатов вычислений заготавливается протокол эксперимента.

Образец протокола эксперимента

№ режима	Δp_H , кг/см ²	Δp_k , кг/см ²	p_H , КПа	p_k , КПа	p_H/p_a	T , К	T/T_a	T_{Φ} , К	δT , %	m_H , г	m_k , г	Δm , г
1												
2												
3												
4												
5												

2. Измерить давление p_a и температуру T_a воздуха в помещении лаборатории.

3. Включить вакуумнасос 5 и, открыв вентили 3 и 4, отвакуумировать резервуар до первого заданного режима Δp_H по вакууметру 2.

4. Перекрыть вентили 3 и 4 и выдержать установку 30 секунд для термостабилизации и проверки герметичности.

5. Нажать кнопку на экспозиметре 6 для впуска воздуха в резервуар (время открытия клапана задается заранее). Впускной клапан 6 закроется автоматически.

6. Открыть вентиль 3 для измерения перепада давления в резервуаре Δp_k .

7. Повторить пункты 3, 4, 5, 6 для каждого следующего режима Δp_H .

8. Выключить вакуумнасос.

9. Результаты всех измерений записать в протокол.

Обработка результатов эксперимента

1. Рассчитать начальное абсолютное давление в резервуаре:

$$p_H = p_a - \Delta p_H$$

2. Рассчитать конечное абсолютное давление в резервуаре

$$p_k = p_a - \Delta p_k$$

Примечание: 1 кг/см² = 98.1 кПа

3. Рассчитать относительную степень вакуумирования

$$\frac{p_H}{p_a}$$

4. Рассчитать теоретическую температуру нагрева газа в резервуаре:

$$T = T_a \frac{k}{1 + (k-1) \frac{p_H}{p_a}}$$

5. Рассчитать фактическую T_ϕ экспериментальную температуру подогрева газа в резервуаре.

Так как для измерения температуры используется сам резервуар как газовый термометр, будем считать, что в момент закрытия клапана давление в резервуаре равно атмосферному, изохорное остывание воздуха приводит к падению давления до p_k .

Используя уравнение, можно записать для момента закрытия клапана:

$$m_k R = \frac{p_a V}{T_\phi}$$

для момента выравнивания температуры газа и стенки резервуара:

$$m_k R = \frac{p_k V}{T_a}.$$

После совместного решения уравнений:

$$T_\phi = T_a \frac{p_a}{p_k}.$$

6. Рассчитать теоретическую и фактическую степени нагрева:

$$\frac{T}{T_a} \text{ и } \frac{T_\phi}{T_a}.$$

7. Рассчитать относительное расхождение экспериментальных и расчётных данных

$$\delta T = \frac{\frac{T}{T_a} - \frac{T_\phi}{T_a}}{\frac{T}{T_a}} \cdot 100\%.$$

8. Рассчитать массу газа в резервуаре, используя уравнение слияния:

а) масса газа в резервуаре после вакуумирования (начальная)

$$m_H = \frac{p_H V}{RT_a};$$

б) масса газа в резервуаре после втекания (конечная)

$$m_K = \frac{p_K V}{RT_a};$$

в) масса газа, вошедшего в резервуар

$$\Delta m = m_k - m_H.$$

9. Построить теоретическую и экспериментальную зависимость степени нагрева газа от степени вакуумирования резервуара:

$$\frac{T}{T_a}, \frac{T_\phi}{T_a} = f\left(\frac{p_H}{p_a}\right)$$

Содержание отчета

1. Протокол эксперимента со схемой установки.
2. Графики теоретической и экспериментальной зависимости:

$$\frac{T}{T_a}, \frac{T_\phi}{T_a} = f\left(\frac{p_H}{p_a}\right)$$

3. Расчет относительного расхождения экспериментальных расчетных данных δT , %.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы к работе

1. Что такое термодинамическая система?
2. Каким требованиям должна удовлетворять термодинамическая система?
3. Чем объясняется подогрев газа при наполнении резервуара?
4. Каково предельное значение степени подогрева газа?
5. Чем объясняется расхождение расчетных экспериментальных данных по степени подогрева газа в резервуаре?
6. Как измеряется температура воздуха в резервуаре?
7. Какой газ при прочих равных условиях подогреется больше при втекании - водород или воздух?
8. Как изменился бы эффект подогрева, если бы эксперимент проводился на избыточном давлении?
9. К каким термодинамическим процессам относится заполнение резервуара сжатым газом?
10. Как можно повысить точность измерения величин Δp_H и Δp_K ?

Список использованных источников

1. Кирилин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. - М: Энергия, 1983, с. 215 - 220.

Лабораторная работа №3

Исследование процесса истечения воздуха через суживающееся сопло

Цель работы: экспериментальное изучение процесса адиабатного истечения воздуха через суживающееся сопло, подтверждение теоретической зависимости изменения расхода газа.

Задача работы: исследовать изменение расхода воздуха, вытекающего из суживающегося сопла, в зависимости от степени расширения по давлению.

Теоретические основы процесса

Процессы движения газов по каналам осуществляются во многих машинах и аппаратах. Поэтому изучение этих процессов и связанных с ними различных преобразований энергии в движущемся потоке газа приобретает важное значение.

Основной задачей термодинамического анализа применительно к газовому потоку является определение скорости истечения, секундного расхода газа, а также установление условий, существенно влияющих на процесс истечения и его эффективность.

В данной работе считаем, что течение газового потока изотропное и стационарное.

При адиабатном течении газа увеличение кинетической энергии происходит за счет уменьшения его энтальпии, а следовательно, и внутренней энергии. Увеличение скорости газа происходит при уменьшении его давления и температуры, а следовательно, и при уменьшении местной скорости звука. Теоретически расход газа через сопло определится по выражению

$$m_T = f \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 \rho_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (1)$$

Здесь f - сечение сопла, м²;
 k – показатель адиабаты газа;
 ρ - плотность газа, кг/м³;
 p - давление, Па.

Если в формуле (1) рассмотреть выражение, находящееся под знаком корня, то можно увидеть, что оно представляет собой плотность тока через сопло - расход через единицу площади в единицу времени. Это понятие определяется из уравнения постоянства расхода

$$\rho c = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 \rho_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (2)$$

Размерность левой и правой частей уравнения (2) будет кг/м²·с. Если принять, что в (2) $p_1 = const$, $\rho_1 = const$, а p_2 изменяется, оставаясь постоянным во время процесса истечения, то плотность тока обращается в нуль дважды: при значении $p_2 = p_1$ (так как $\frac{p_2}{p_1} = \beta = 1$) и $p_2 = 0$ (когда $\beta = 0$). Подставляя при этих условиях в (2) ряд значений β , промежуточных между 1 и 0, можно рассмотреть график плотности тока 0-K-1 (рис. 1).

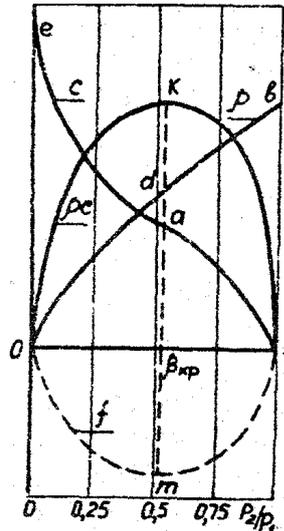


Рисунок 1 - График изменения параметров газа для сопла

График имеет максимум при $\beta_{кр}$. Здесь производная $\frac{d\rho c}{d\beta}$ обращается в нуль, что приводит к следующему выражению для $p_2=p_{кр}$:

$$\frac{2}{k} \left(\frac{p_{кр}}{p_1} \right)^{\frac{2-k}{k}} - \frac{k+1}{k} \left(\frac{p_{кр}}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = 0$$

откуда следует, что

$$\frac{p_{кр}}{p_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \beta_{кр}.$$

Если на графике плотности тока (рис.1) показать изменение параметров: скорости истечения C и плотности ρ , то они выразятся кривыми $l a e$ и $o d b$ соответственно. Причем плотность будет изменяться от значения ρ_{max} при $\beta=1$ до $\rho \rightarrow 0$ при $\beta \rightarrow 0$. Это следует из уравнения состояния идеальных газов $\rho = \frac{p}{RT}$. Скорость будет возрастать от значения $c=0$ (при $\beta=1$, $p_1=p_2$ истечения нет) до значения c_{max} при $\beta \rightarrow 0$, где $c_{max} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1}$. Для обеспечения изменения скорости, плотности газа и плотности тока согласно рис. 1 необходимо специальным образом профилировать канал сопла. Так как расход газа через сопло будет величиной постоянной, то из уравнения расхода получим $f = \frac{m}{\rho c}$. График изменения площади представлен на рис. 1, кривая $o m l$.

Так как при $\beta_{кр}$ плотность тока имеет максимальную величину, то расход газа в этом случае будет максимален для данной площади сопла.

Опыт показывает, что расходу газа соответствует правая ветвь графика (рис. 1, кривая $l-a$), совпадающая с результатами, следующими из уравнения (1). Это объясняется тем, что давление на срезе сопла p_2 и давление среды p'_2 , куда истекает газ, в каждом опыте оказываются равными ($p_2=p'_2$) вплоть до достижения критического отношения давлений $\frac{p_2}{p_1} = \frac{p'_2}{p_1} = \beta_{кр}$, когда при дальнейшем понижении давления среды p'_2 расход газа остается максимальным и неизменным. В этом слу-

чае давление газа на срезе сопла p_2 равно критическому $p_{кр}$, при котором скорость истечения становится равной местной скорости звука.

Изменение расхода по левой ветви графика рис. 1 (кривая $a-0$) вследствие вышеизложенного не может быть обеспечено, так как эта ветвь построена при предпосылке, что давление в устье сопла p_2 продолжает изменяться (уменьшаться) одновременно с понижением давления p'_2 среды, куда истекает газ. В действительности же $p_2 = const$ при сверхкритическом режиме истечения, следовательно, согласно уравнению (1), $m_1 = const$.

Таким образом, понижением давления в среде ниже критического нельзя добиться такого же понижения давления в устье сужающегося сопла, а значит - нельзя в нем получить скорость выше скорости звука и увеличить расход газа через него.

Используя аналитическое выражение первого начала термодинамики в форме $dq = di - vdp$, можно определить, что при истечении обратимого адиабатного потока $di = -vdp$ и, следовательно, располагаемая работа, которая может перейти в кинетическую энергию потока, определяется через энтальпию газа:

$$l_0 = - \int_{i_1}^{i_2} di = i_1 - i_2. \quad (3)$$

Графически располагаемая работа газа в $p-v$ диаграмме для процесса истечения 1-2 изображается в виде площади, ограниченной кривой процесса, линиями $p=p_1$ и $p=p_2$ и осью координат (рис. 2). Располагаемый термоперепад (3) удобно изображать в $i-S$ диаграмме (рис. 3).

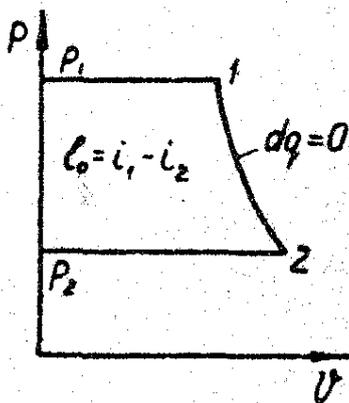


Рисунок 2 – Располагаемая работа газа

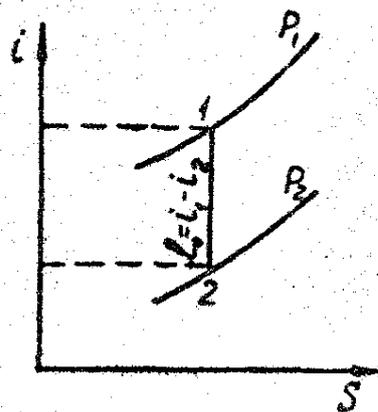


Рисунок 3 – Располагаемый теплоперепад потока

Скорость истечения из резервуара определяется располагаемым теплоперепадом $c = \sqrt{2(i_1 - i_2)}$, или для случая адиабатного истечения при $c_1 = c$:

$$c = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (4)$$

Графически теоретическое изменение скорости при истечении газа через сопло изображается кривой $l-a-e$ (рис. 4).

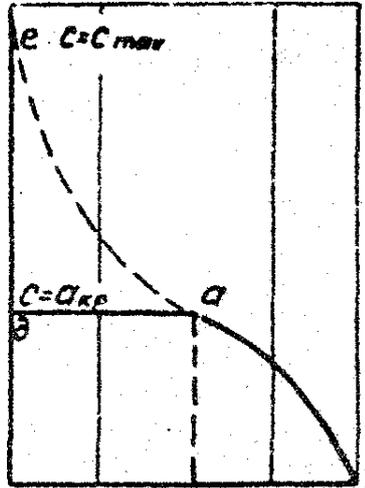


Рисунок 4 – Скорость истечения через сопло

Эксперимент показывает, однако, что значение скорости хорошо согласуется с правой частью кривой $l-a$, а затем остается постоянным $a-d$, т. е. значение скорости истечения достигает своего максимального значения, равного местной скорости звука при $\beta=\beta_{кр}$, а затем для суживающегося сопла остается постоянным, так как перераспределения давления внутри сопла при $\beta < \beta_{кр}$ не происходит и, следовательно, не изменяется давление на срезе сопла.

Описание лабораторной установки

На рис. 5 приведена схема экспериментальной установки. На ней показано исследуемое суживающееся сопло 4, через которое про-

исходит истечение воздуха при перепаде давлений $\beta = \frac{P_2}{P_1}$. Объемный

расход воздуха на установке измеряется с помощью лабораторного газового счетчика 2. Воздух из окружающего помещения (резервуара неограниченной емкости) поступает через газовый счетчик по воздухопроводу к соплу. Перед счетчиком измеряется температура поступающего воздуха с помощью ртутного термометра. Замер давления перед соплом и давления в ресивере 6 осуществляется водяным пьезометром 3 и вакуумметром 5. Требуемый перепад давления на сопловом устройстве (установка режимов при работе) осуществляется с помощью вентиля 7. Воздушный поток создается вакуумным насосом 8.

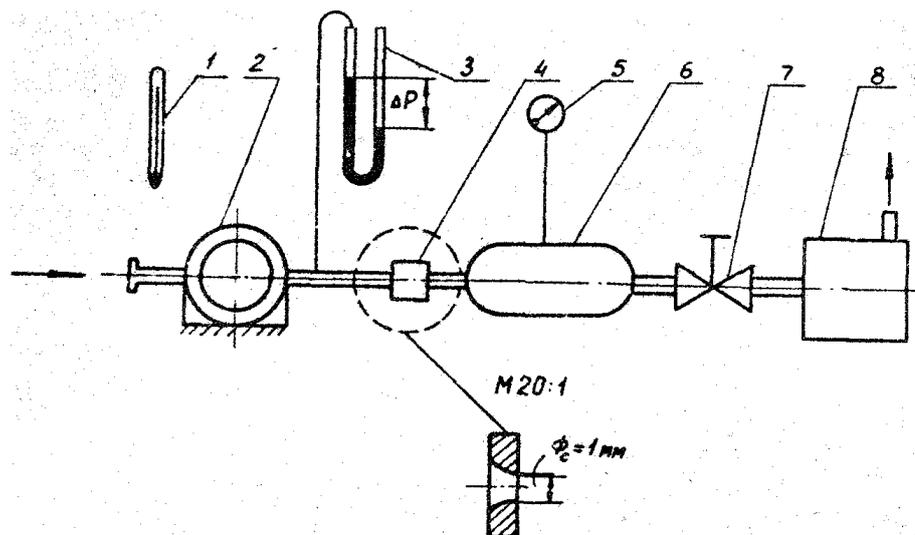


Рисунок 5 – Схема установки

Порядок выполнения работы

Перед началом опыта необходимо проверить работу газового счетчика и вакуумметра. Для этого включают вакуумный насос при полностью открытом вентиле 7, который затем слегка прикрывают, наблюдая за работой приборов. Опыт предусматривает 12-14 замеров при различных режимах.

Перед экспериментом необходимо измерить атмосферное давление и рассчитать значение показания вакуумметра при $\beta_{кр} = \frac{P_{кр}}{P_1}$.

При эксперименте необходимо обязательно провести измерение при $\beta_{кр}=0.528$ и несколько измерений при $\Delta\beta=0.05$ в окрестности критической точки.

Начало опыта необходимо провести при $\beta=0.98...0.97$. Последующее увеличение перепада давлений, регистрируемого вакуумметром 5, устанавливается путем плавной регулировки его вентилем 7. Рекомендуются следующие значения β : 0.95; 0.9; 0.85; 0.75. Далее следует изменять режим так, чтобы значение β в каждом последующем опыте уменьшалось приблизительно на 0.1 по сравнению с предыдущим, до значений $\beta=0.25$ (до полностью открытого вентилем 7). Режим истечения воздуха через сопло при различных значениях устанавливается достаточно быстро, необходимо лишь следить за показаниями вакуумметра 5, которые должны быть постоянными в течение замера расхода воздуха.

Для каждого перепада давлений с помощью электросекундомера измеряется время истечения заданного объема воздуха V . Данные Δp_1 , τ , Δp_2 записываются в протокол наблюдений. После окончания опыта установку отключают. Рекомендуется задавать $V=3...5$ дм³.

Обработка результатов эксперимента

Объемный расход воздуха определится соотношением

$$m_V = \frac{V}{\tau},$$

где V – заданный объем воздуха, дм³.

Вычисляя давление перед соплом $p_1=p_a+\Delta p_1$, определим фактический массовый расход m_ϕ воздуха, где p_a – атмосферное давление, Па.

$$m_\phi = m_V \rho \quad (6)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³, $\rho = \frac{p_1}{RT_1}$;

p – давление, Па;

R – газовая постоянная, Дж/кг·К;

T – температура, К.

Течение газа в сопловом канале считаем адиабатным (энергетический обмен между окружающей средой и воздухом практически отсутствует, так как время контакта газовых частиц со стенками очень мало). Для расчета скорости истечения используем уравнение адиабатного течения, откуда теоретическая скорость истечения в м/с определится уравнением

$$c = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right] \frac{p_1}{\rho_1}}. \quad (7)$$

Величина теоретического расхода воздуха в кг/с через сопло определится по формуле

$$m_T = f \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 \rho_1 \left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right)},$$

где f - сечение сопла, м².

Расчеты m_T следует провести для всех значений β . Для воздуха критическое отношение давления $\beta_{кр} = 0.528$. При $\beta \leq \beta_{кр}$, m_T постоянен и равен m_T максимальному.

По полученным опытным данным и результатам проведенных расчетов построить графики зависимости расхода воздуха через сопло как функцию отношения давления $m_\phi = \phi_1(\beta)$; $m_T = \phi_2(\beta)$. По этим графикам определить значение критического отношения давлений. Построить график скорости $c = \phi(\beta)$ по протоколу испытаний.

Протокол записи измерений

Номер режима	Измеренные величины			Рассчитанные величины						
	Δp_1 , мм вод. ст.	τ , с	Δp_1 , кг/см ²	p_1 , кПа	p_2 , кПа	β	m_T , дм ³ /с	m_ϕ , г/с	m_T , г/с	c , м/с
1										
2										

Содержание отчёта

1. Принципиальная схема и описание установки.
2. Протокол эксперимента.
3. Расчеты скорости, расходов, коэффициента расхода.
4. Графики m_ϕ , m_T , c как функции β .

Лабораторная работа №4

Определение коэффициента расхода микросопла нестационарным методом

Цель работы: углубление знаний по основам газовых течений и приобретение навыков экспериментального исследования частных задач технической термодинамики.

Задание. Определить коэффициент расхода микросопла μ нестационарным методом.

Коэффициент расхода используется в расчетах истечения газов и жидкостей через отверстия. Расчетным путем определяется теоретический расход G_T кг/с (действительный расход G_d всегда меньше). Теоретическое решение задачи о расходе правильно отображает внутреннюю взаимосвязь и влияние основных параметров, но не является точным.

Для связи величин G_T и G_d используется коэффициент расхода $\mu < 1$, вводимый в качестве поправочного множителя:

$$G_d = \mu G_T \quad (1)$$

Величина μ всегда определяется экспериментально в условиях, близких к условиям действительного течения. Следовательно, она является количественной мерой отклонения действительного процесса от теоретически рассчитываемого.

Численные значения μ колеблются в достаточно широких пределах ($\mu \approx 0,5 \dots 0,98$) и зависят от многих факторов.

Коэффициенты расхода для некоторых стандартных расходомерных устройств (мерные сопла, мерные шайбы, трубы Вентури) изучены в метрологических организациях и нормированы в государственном масштабе. Однако действующие правила распространяются только на круглые проходные сечения диаметром не менее 20 мм.

В инженерной практике часто возникает потребность в расчете или нормировании расходов газа, протекающего через местные малые проходные сечения с различной формой поперечного и продольного сечения канала. Для всех индивидуальных конструкций необходимо предварительно экспериментально определять μ (подобные конструктивные элементы с проходным сечением любой формы до 5 мм² для краткости далее будем именовать микросоплами).

На сегодня опытное определение μ для микросопел является сложной технической и организационной задачей. Эта работа может быть выполнена только в центральных метрологических организациях. В настоящее время простых методов для быстрого определения μ не существует. Поэтому разработка новых методов, позволяющих экспериментально достаточно просто и точно определять эту величину, является актуальной проблемой измерительной техники.

Существуют две специфические области течений газов, определяемые соотношением давлений до и после сопла, - подкритическая и надкритическая. Для одного и того же микросопла коэффициенты расхода будут различными в зависимости от области течения.

Ниже рассматривается метод, позволяющий экспериментально определять μ для микросопел в надкритической области течений.

Опыты проводились с различными микросоплами, коэффициенты расхода которых предварительно были достаточно точно определены другими методами. Расхождение в результатах не превышало 2...4%. Поэтому предлагаемый метод может быть рекомендован для широкого практического применения как не представляющий трудности в производственных условиях.

Новый метод опирается на закономерности истечения сжатого газа из резервуара постоянного объема через микросопло постоянного сечения. Теоретическое решение этой задачи позволяет установить зависимость текущего давления в емкости от времени. Результаты решения во многом зависят от закономерности изменения температуры газа в емкости в процессе самого истечения.

Для данного метода особый интерес представляет случай, когда температура газа в емкости является величиной постоянной ($T_0 = \text{const}$). В этом случае решение имеет вид

$$\ln \frac{p_i}{p_0} = - \left(\frac{\mu \psi_{\max} f \sqrt{RT_0}}{V} \right) \tau + \text{const}, \quad (2)$$

где p_i - текущее давление;
 p_0 - начальное давление;
 μ - коэффициент расхода;
 f - площадь сопла;
 V - объем емкости, м³;
 T_0 - температура газа в емкости;
 R - газовая постоянная (для воздуха она равна 287 Дж/кг·К);
 τ - время, с;

ψ_{\max} - постоянная величина в уравнении расхода в надкритической области:

$$\psi_{\max} = \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{k}$$

(для воздуха $\psi_{\max}=0,685$).

Здесь $k=1,4$ - показатель адиабаты идеального газа.

Уравнение (2) можно переписать в более общем виде:

$$\lg p_i = -m \tau + const, \quad (3)$$

где величина

$$m = \frac{\mu \psi_{\max} f}{\sqrt{2,303}} \sqrt{RT_0} \quad (4)$$

представляет собой комбинацию постоянных величин.

Из (3) следует, что в полулогарифмических координатах ($\lg p_i \div \tau$) выражение (3) отображается уравнением прямой линии, где m имеет смысл тангенса угла наклона прямой к оси абсцисс и определяется из графика. Величина m в дальнейшем именуется темпом падения давления. Зная величину m , определяем коэффициент расхода

$$\mu = m \frac{2,303 \cdot V}{f \psi_{\max}} \cdot \frac{1}{\sqrt{RT}}. \quad (5)$$

Для удобства расчета выражение (5) можно записать в виде

$$\mu = C \frac{m}{f \sqrt{T}}, \quad (6)$$

где C - постоянная величина для данной установки.

$$C = \frac{2,303 \cdot V}{\psi_{\max} \sqrt{R}} = 1,575 \cdot 10^{-2}. \quad (7)$$

Необходимо иметь в виду, что все полученные соотношения (2)...(6) справедливы, если предположить постоянство температуры газа в емкости.

Прямые опытные исследования показывают, что при истечении газа из емкостей объемом до 200 л процесс протекает в следующей последовательности: сначала температура газа плавно понижается на некоторую величину $\Delta t = 3 \dots 20^\circ$, а затем практически остается постоянной вплоть до наступления подкритической фазы истечения.

Таким образом, при истечении самообразуется изотермическая фаза истечения. Этот процесс является объективным свойством истечения из емкостей постоянного объема и не зависит от формы резервуара,

что объясняется особенностями теплообмена между зарядом газа и стенками баллона.

Постоянство температуры практически наступает через 1...2 мин после начала истечения (общая длительность истечения обычно составляет 6...10 мин).

Зависимости $\lg p = f(\tau)$ и $t = f(\tau)$ показаны на совмещенном графике (рис. 1).

Для расчета μ из соотношения (6) используются значения m и T , определенные на участке изотермической фазы.

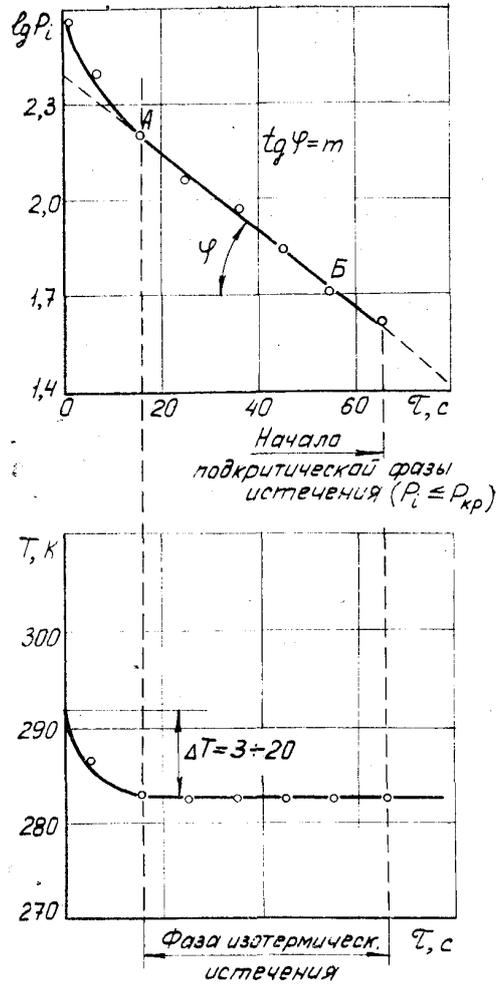


Рисунок 1. График зависимости 1) $\lg p_i = f(\tau)$, 2) $T = f(\tau)$

Описание лабораторной установки

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

Основной частью установки является баллон 1. К баллону присоединен короткий патрубок, к которому крепится образцовый манометр 2. На выходе из патрубка крепится испытуемое сопло 3. В центре баллона помещена термопара 4 для замера температуры воздуха в процессе истечения. Холодные спаи термопары объединены с термометром 5, помещенным в окружающей нас атмосфере.

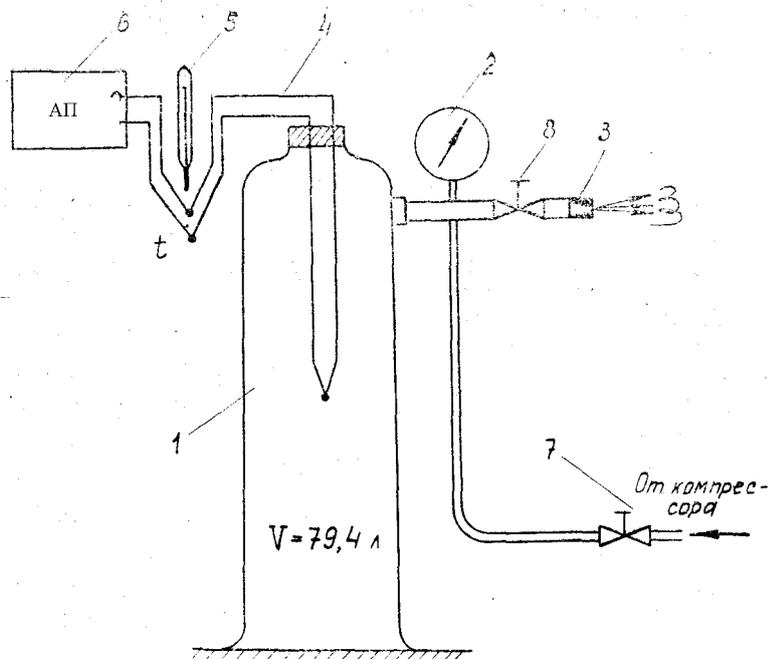


Рисунок 2. Схема установки для определения коэффициента расхода микросопла нестационарным методом: 1 – баллон, 2 – образцовый манометр, 3 – испытуемое микросопло, 4 – ЖК термопара, 5 – термометр, 6 – автоматический потенциометр, 7 – запорный вентиль, 8 – вентиль

Потенциальные выводы присоединены к автоматическому потенциометру 6.

Перед опытом баллон закачивается воздухом от компрессора.

Порядок выполнения работы

После закачки баллона до $p=1,0$ МПа делается выдержка в 5...10 мин для выравнивания температуры воздуха в емкости с температурой окружающей среды (проверяется потенциометром, его показание должно быть примерно равно атмосферной температуре).

Одновременно проверяется утечка воздуха (за одну минуту допустимо понижение давления на 0,005 МПа). Далее записываются исходные показания манометра, термопары, термометра и барометрическое давление.

После этого необходимо быстро открыть вентиль 8 и произвести запись показаний манометра 2 [$\text{кг}/\text{см}^2$] и термопары 4 с интервалом в 30с. Отсчет времени производится по секундомеру. Опыт заканчивается при $p \approx 1 \text{ кг}/\text{см}^2$ (конец надкритической фазы истечения).

По ходу опыта записи заносятся в протокол.

Обработка результатов эксперимента

1. Определяется абсолютное давление

$$p_{iabc} = p_{iизб} \cdot 98065 + B,$$

где $p_{iизб}$ - избыточное текущее давление в баллоне, $\text{кг}/\text{см}^2$; B - барометрическое давление, Па.

2. Определяется $\lg p_{iabc}$ с точностью до третьего знака после запятой.

3. Строится график (см. рис. 1) $\lg p_{iabc} = f_1(\tau)$ и $t = f_2(\tau)$. По графику $t = f_2(\tau)$ определяется участок изотермической фазы истечения (небольшие колебания $\sim \pm 1$ К могут иметь место).

В пределах изотермической фазы на графике $\lg p_{iabc} = f_1(\tau)$ проводится осредняющая прямая.

4. Определяется темп падения давления

$$m = \frac{\lg p_{iA} - \lg p_{iB}}{\tau_B - \tau_A},$$

где А и Б - любые две точки, лежащие на осредняющей прямой.

5. По соотношению (6) рассчитывается коэффициент расхода

$$\mu = C \frac{m}{f \sqrt{T}},$$

где $f=3,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ (3,28 мм²) - площадь сопла;

$T, \text{ К}$ - температура воздуха на участке изотермической фазы (определена с точностью $\pm 1 \text{ К}$).

Результаты измерений и вычислений заносятся в протокол.

Величина	Номер измерения							
	0	1	2	3	4	5	6	7
$\tau, \text{ с}$								
$p_i \text{ изб.}, \text{ кг/см}^2$								
$p_i \text{ абс.}, \text{ МПа}$								
$\lg p_i \text{ абс}$								
$t, \text{ }^\circ\text{C}$								
$T, \text{ К}$								

Содержание отчёта

1. Принципиальная схема установки.
2. Протокол записи показания измерительных приборов.
3. Графики зависимости $\lg p_{i \text{ абс}} = f_1(\tau)$ и $t = f_2(\tau)$ и результаты их обработки.
4. Обработанные результаты опыта.

Контрольные вопросы

1. Как найти теоретическое значение коэффициента расхода?
2. Является ли коэффициент расхода константой сопла для всех режимов истечения?
3. Чем объясняется постоянство температуры воздуха в баллоне при его опорожнении?

Лабораторная работа №5

Определение среднего значения показателя политропы и работы процесса сжатия

Цель работы - исследование политропного процесса сжатия газа в цилиндре.

Работой предусматривается:

1. Определение среднего значения показателя политропы процесса сжатия газа.
2. Оценка величины механической работы, затрачиваемой при сжатии.
3. Составление отчета по выполненному исследованию.

Теоретические основы исследования

Политропные процессы

Совокупность изменений, происходящих в рабочем теле при конечном переходе из одного состояния в другое, называется процессом изменения состояния. Между начальным и конечным состояниями рабочего тела существует бесконечное множество различных путей перехода, совокупность которых аналитически описать невозможно. Поэтому термодинамика рассматривает только определенный круг процессов, называемых политропными. Они могут быть описаны аналитически.

Все остальное множество процессов при необходимости расчета условно представляется в виде соответствующих политропных процессов с такими же начальными и конечными состояниями и с таким же энергетическим обменом с окружающей средой. Это особенно часто практикуется при исследовании действительных циклов тепловых машин. Основной характеристикой, выделяющей политропные процессы из всего многообразия процессов изменения состояния термодинамических тел, является постоянство отношения приращения внутренней энергии ко всему подведенному теплу, что равнозначно выражению $c = \text{const}$.

Таким образом, политропный процесс характеризуется произвольной, но постоянной теплоемкостью процесса.

1. *Уравнение политропных процессов.* Используя для произвольного политропного процесса уравнение первого начала термодинамики в дифференциальной форме для 1 килограмма газа $dq = cdT = c_v dT + pdv$, уравнение состояния $p\nu = RT$ и вводя величину

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v}, \quad (1)$$

называемую показателем политропы, можно получить уравнение политропного процесса в виде

$$p\nu^n = const. \quad (2)$$

2. *Работа в политропном процессе.* Дифференциальное выражение работы расширения 1 килограмма газа в любом процессе имеет вид $dl = pdv$.

Работу расширения в некотором процессе от состояния 1 до состояния 2 можно представить в виде уравнения

$$l_{1-2} = \int_1^2 pdv. \quad (3)$$

Используя уравнение политропы (2) и интегрируя (3), получим формулу для определения работы расширения газа

$$l_{1-2} = \frac{1}{n-1} (p_1\nu_1 - p_2\nu_2). \quad (4)$$

Результат расчета со знаком минус по формуле (4) соответствует процессу сжатия.

3. *Теплоемкость газа в политропном процессе.* Решим уравнение (1) относительно c и введем в него величину $k = \frac{c_p}{c_v}$ - показатель изэнтропы. В результате получим следующее выражение для теплоемкости политропного процесса:

$$c = c_v \frac{n-k}{n-1}.$$

Таким образом, условие постоянства теплоемкости в политропном процессе не ограничивает ее численного значения, поэтому число политропных процессов бесконечно.

4. *Частные случаи политропных процессов.* Из бесконечного множества политропных процессов можно выделить группу, имеющую

дополнительные ограничения. Это изохорный, изобарный, изотермический и изоэнтропный (адиабатный) процессы.

Изохорный процесс протекает при постоянном объеме: $v=const$. Для него из (1), (2) и (4) следует, что $n=\pm\infty$; $c=c_v$, $l_{1-2}=0$.

Изобарный процесс - при постоянном давлении: $p=const$. Для него из тех же соотношений следует, что $n=0$; $c=c_p$ и $l_{1-2}=(v_2-v_1)\cdot p$

Изотермический процесс - при постоянной температуре: $T=const$ или $pv=const$. Для него получим $n=1$; $c=\infty$, а работа, согласно (3), равна

$$l_{1-2} = \int_1^2 p dv = \int_1^2 const \frac{dv}{v} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Изоэнтропный процесс протекает без теплообмена с окружающей средой: $dq=0$. Выражая тепло через теплоемкость процесса, получим $dq=cdT$. А так как в этом процессе $dT \neq 0$, то $c=0$, и, следовательно, из (1) получим

$$n = \frac{c_p}{c_v} = k.$$

Тогда уравнение изоэнтропного процесса можно записать так: $pv^k=const$, а работа за процесс, согласно (4), запишется в виде

$$l_{1-2} = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2).$$

5. *Определение показателя политропы процесса.* Запишем уравнение политропы для двух конечных состояний

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n.$$

Прологарифмируем и преобразуем полученное выражение:

$$\lg p_1 + n \lg v_1 = \lg p_2 + n \lg v_2;$$

$$\lg p_1 - \lg p_2 = n(\lg v_2 - \lg v_1).$$

Из последнего получаем значение показателя политропы:

$$n = \frac{\lg p_1 - \lg p_2}{\lg v_2 - \lg v_1}. \quad (5)$$

Таким образом, для любого политропного процесса имеет место постоянство отношения разности логарифмов величин абсолютных давлений к разности логарифмов объемов в начальной и конечной точках процесса. Значит, при построении в логарифмических координатах ($\lg p - \lg v$) любой политропный процесс имеет вид прямой (рис. 1), причем тангенс угла наклона ее к оси абсцисс численно равен величине

показателя политропы. Рис. 2 иллюстрирует (на pV -диаграмме) расположение политропных процессов, выходящих из одной и той же точки в зависимости от величины показателя n .

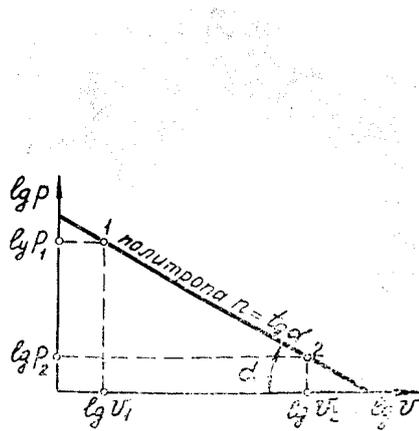


Рис. 1

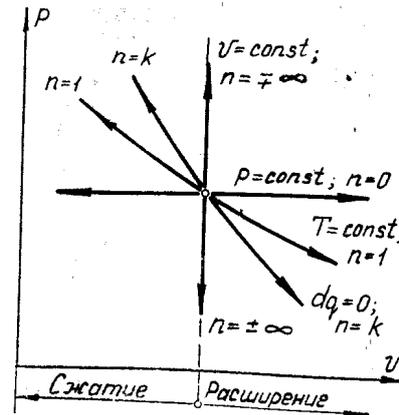


Рис. 2

Описание лабораторной установки

На рис. 3 приведена схема лабораторной установки для исследования процесса политропного сжатия газа (воздуха). В состав установки входят следующие агрегаты:

Цилиндр 1 (двойного действия) с поршнем 2, делящим полость цилиндра на рабочую А и приводную Б; шток 3, на конце которого закреплен подвижный столик 4 с бумагой для записи графика; графопостроитель, включающий в себя систему рычагов 5 с карандашом и пневмопривод с пружиной 6 и поршеньком 7. Установка имеет пневмоэлектропульт управления 8 и баллон для сжатого воздуха 9 для привода поршня 2 в движение, а также два манометра: 10 - для контроля давления сжимаемого газа и 11 - для контроля давления в сети пневмопривода. На пневмоэлектропульте установки размещены вентили 12, 13, 14, 15, 16 для управления работой установки и группа сигнальных ламп, кнопок, тумблеров включения электроклапана и электромагнитного вибратора, который присоединен к графопостроителю с целью уменьшения влияния на точность записи параметров процесса сил трения в рычажной системе. Электроклапан позволяет подать воздух в полость Б с большой скоростью.

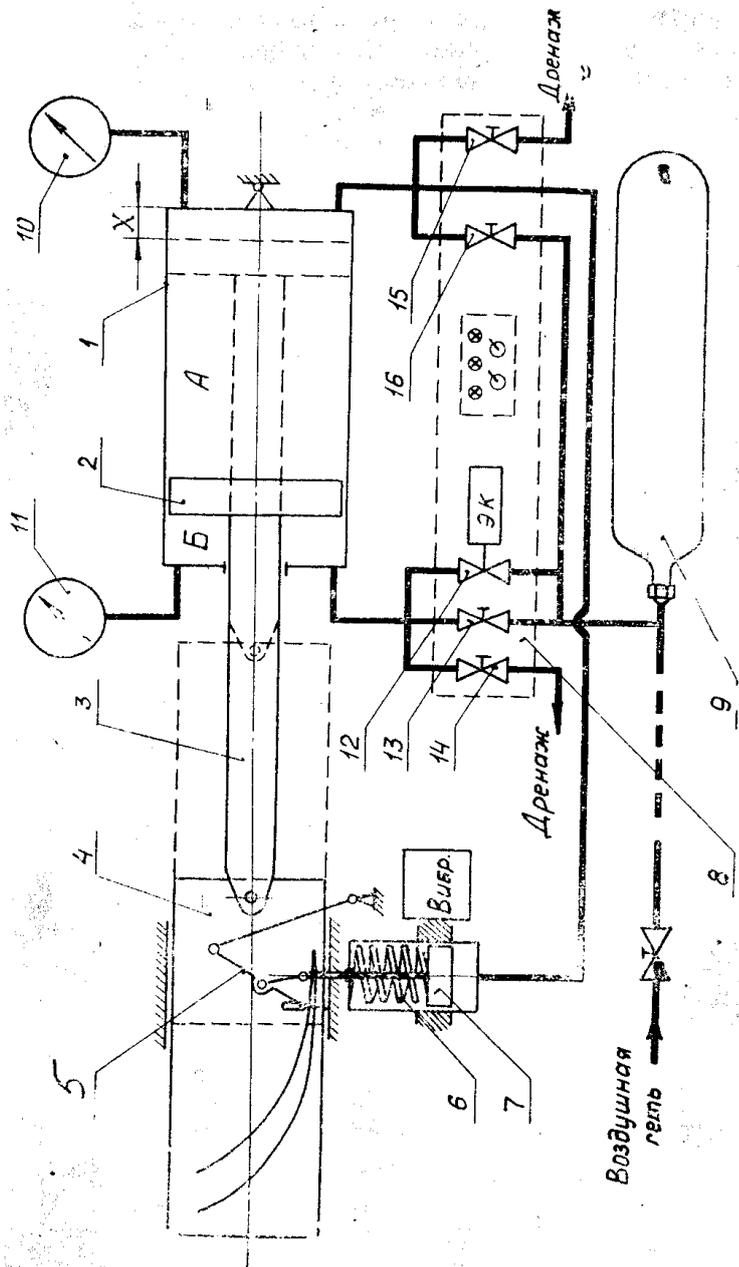


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки

Практическая часть

Порядок выполнения лабораторной работы

Убедиться, что все вентили пневмопульта установки закрыты. Открыть вентиль 13 и по манометру 11 определить давление воздуха P_{\max} в сети (в баллоне 9), записать в протокол измерений. На щитке тумблером включить электропитание установки постоянным и переменным напряжением (загорятся все сигнальные лампы). Закрыть вентиль 13 и еще раз убедиться, что все вентили закрыты.

Чтобы подготовить установку для политропного сжатия газа (воздуха) в полости А цилиндра 1, необходимо переместить поршень 2 в крайнее левое положение. Для этого надо открыть дренажный вентиль 14, и, плавно открывая вентиль 16, подать воздух в полость А, в результате чего поршень 2 будет перемещаться влево до упора (слышен характерный звук удара). Закрыв вентиль 16, открыть дренажный вентиль 15 для выравнивания давления в полости А с атмосферным, контролируя падение давления в полости по манометру 10. После небольшой выдержки (30...40 с) закрыть вентиль 15. Еще раз проверить, что все вентили закрыты.

Установить на столик 4 лист бумаги, вырезанный по формату столика, и закрепить его. Поджать пружинкой карандаш графопостроителя к листу и включить тумблером электромагнитный вибратор. Нажатием кнопки на пульте открыть электроклапан, подающий воздух из баллона 9 в полость Б цилиндра 1. Вместо включения электроклапана можно быстро открыть вентиль 13, что тоже позволит подать сжатый воздух в полость Б. В любом случае поршень 2 начнет перемещаться вправо, осуществляя тем самым сжатие порции газа (воздуха), заключенной в полости А. По манометру 10 визуально фиксируется изменение давления (рост его), а графопостроителем через поршень 7, систему рычагов 5 на бумаге, перемещающейся со столиком и штоком, записывается кривая $pv^n = \text{const}$. Сразу после прекращения движения поршня на графике фиксируем точку p_{2n} (см. рис. 4), а в протокол записываем давление по манометру 10.

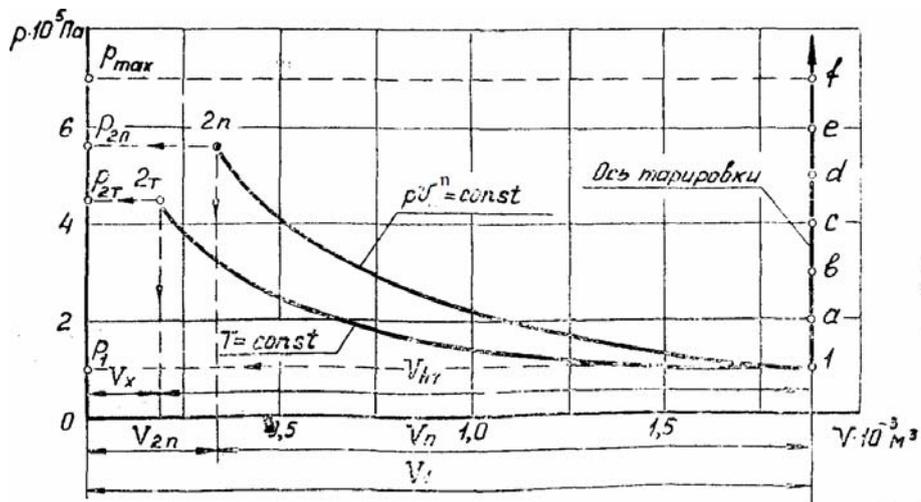


Рисунок 4

Сделав выдержку по времени для достижения термического равновесия системы (остывание сжатого газа), фиксируем точку p_{2T} и записываем давление по манометру 10.

Далее осуществляем изотермическое расширение газа, сжатого в полости А, плавно открываем дренажный вентиль 14, медленно стравливая воздух из полости Б. Под действием сжатого газа (воздуха) в полости А поршень пойдет в крайнее левое положение, а карандаш графопостроителя должен возвратиться в точку 1 (рис. 4), построив кривую процесса $T=const$.

Воздух из полости Б необходимо стравливать не сразу, а постепенно, прикрывая вентиль 14 каждые 10^5 Па (по манометру 10) и фиксируя точками положение карандаша на бумаге после небольшой выдержки системы. Значения давлений в полости А записываем в протокол наблюдений.

Затем необходимо проверить тарировку пружины 6 графопостроителя, для чего после завершения изотермического расширения, открывая вентиль 16, повышаем давление в полости А до p_{max} , отмечая на графике положение карандаша через каждые 10^5 Па (точки a, b, c, d). Напоминаем, что включение вибратора в процессе изотермического расширения и тарировки обязательно.

Обработка результатов опыта

Полученную на графопостроителе диаграмму сжатия и расширения газа в полости А необходимо перестроить в p - V координатах. Предварительно определяем величину X - расстояние между торцевой стенкой цилиндра и поршнем (см. рис. 3), находящимся в крайнем правом положении. Это позволит учесть влияние на процессы сжатия и расширения газа, заключенного в этом объеме. Строго говоря, следовало бы учесть также объем и массу газа, находящегося в трубопроводе, манометрической трубке, в полости поршня графопостроителя, но влияние этих величин будет незначительным. Объем газа в полости X равен

$$V_x = XF_n,$$

где $F = \frac{\pi D_n^2}{4}$ - площадь поршня, m^2 . ($D_n=0,13$ м)

Значение X находим из уравнения Бойля-Мариотта:

$$p_1 V_1 = p_{2T} V_x,$$

но

$$V_1 = V_x + V_{hT} = (X + h_T) \cdot F_n,$$

где h_T - ход поршня при изотермическом расширении (рис. 4), определяемый из графика. Тогда

$$p_1 F_n (X + h_T) = p_{2T} F_n X$$

или

$$p_1 X + p_1 h_T = p_{2T} X,$$

откуда

$$X = \frac{p_1 h_T}{(p_{2T} - p_1)}.$$

Определив значения V_1 , V_x , V_{hT} , V_n , строим в принятых масштабах μ_p и μ_v диаграмму процессов сжатия и расширения, используя значения абсолютных давлений p_1 , p_{2T} и p_n и промежуточных абсолютных давлений, снимаемых с графика рис. 4 (или записанных в протоколе наблюдений) для точек II, III, IV, V, а также VI, VII и VIII.

Согласно (2), запишем равенство $p_1 v_1^n = p_{2n} v_{2n}^n$, которое в соответствии с (5) позволяет найти среднее значение показателя политропы процесса сжатия:

$$n = \frac{\lg p_{2n} - \lg p_1}{\lg V_1 - \lg V_{2n}}.$$

При аккуратном проведении опыта и построении диаграммы p - V значение n для изотермы расширения равно

$$n = \frac{\lg p_{2T} - \lg p_1}{\lg V_1 - \lg V_x} \approx 1.$$

По значениям давления и объемов в начальной и конечной точках процесса и одной промежуточной строим график политропного процесса в координатах $\lg p$ - $\lg V$ (рис. 1).

Работу сжатия газа (в Дж) находим по выражению (4), учитывая, что сжимался не 1 кг газа, а некоторое его количество (в кг).

$$m = V_1 \rho,$$

где

$$m = (X + h_T) F_n \rho_1 = \frac{\pi D_n^2}{4} \rho_1 (X + h_T).$$

Следовательно, для политропного процесса

$$L = \frac{1}{n-1} (p_1 V_1 - p_{2n} V_{2n}).$$

Для изотермического: $L = mRT_1 \ln \frac{p_1}{p_{2T}}$.

Полученное значение работы сжатия и расширения сравниваем со значением её, определяемым из диаграммы p — V . Площадь, заключенная под кривой процесса сжатия 1-2n ординатами и абсциссой V , должна быть численно равна работе сжатия и определяется подсчетом

клеток. Площадь каждой клетки, $\frac{H \cdot m}{\text{дел}^2}$:

$$f_{\text{кл}} = \mu_p \mu_v,$$

где μ_p - линейный масштаб от давлений, $\frac{H}{\text{м}^2 \cdot \text{дел}}$;

μ_v - линейный масштаб от объемов, $\frac{\text{м}^3}{\text{дел}}$.

Площадь под кривой процесса, Нм:

$$F_{\text{процесса}} = f_{\text{кл}} N,$$

где N - число клеток, принятых за единицу масштаба.

Аналогичный расчет проводим для процесса расширения. Результаты измерений и расчетов в ходе проведения лабораторной работы заносятся в протокол испытаний, представленный в виде таблицы.

Протокол записи измерений

Процесс № точки параметра	Политропа						Изотерма				
	I	II	III	IV	V	2n	2 T	VI	VII	VIII	I
$p_{изб}, \text{Па}$											
$p_{абс}, \text{Па}$											
$h, \text{м}$											
$V, \text{м}^3$											
n											
$m, \text{кг}$											
$l_{теор}, \text{Дж/кг}$											
$\mu_p, \text{Дж/кг} \cdot \text{дел}$											
$\mu_v, \text{м}^2/\text{дел}$											
$N, \text{дел}^2$											
$l_{граф}, \text{Дж/кг}$											
$\Delta l, \%$											

Содержание отчёта

1. Принципиальная схема и описание установки.
2. Протокол эксперимента.
3. Диаграмма p — V сжатия и расширения.
4. Расчеты значений X , n , l и других величин.

Лабораторная работа № 6

Изохорический процесс для воды и водяного пара

Цель работы: ознакомление со свойствами воды и водяного пара при высокой температуре и давлении.

Задача: экспериментально определить зависимость между давлением и температурой для воды и водяного пара, нагреваемых (или охлаждаемых) при постоянном объеме; построить изохоры, соответствующие различным удельным объемам (меньше и больше критического); вычислить удельную теплоту парообразования при фазовом переходе.

Теоретические основы эксперимента

Для идеального газа справедливо уравнение состояния, имеющее вид

$$pV = m \frac{R_{\mu}}{\mu} T, \quad (1)$$

где p - давление, Па (Н/м^2); V - объем, занимаемый газом, м^3 ; m - масса газа, кг; R_{μ} - универсальная газовая постоянная, одинаковая для килограмм-моля любого газа и равная $8314.3 \text{ Дж/кмоль}\cdot\text{К}$; μ - масса килограмм-моля газа, кг/кмоль ; T - термодинамическая температура газа, К.

Если обозначить через $R = \frac{R_{\mu}}{\mu}$ удельную газовую постоянную,

то уравнение (1) для 1 кг газа можно записать как

$$pv = RT, \quad (2)$$

где $v = \frac{V}{m}$ - удельный объем газа, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Уравнение (1) получено в предположении, что между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия и объем, занимаемый молекулами, исчезающе мал по сравнению с объемом газа. Для описания поведения реальных газов это уравнение применимо лишь в частном случае, когда параметры газов находятся вдали от области конденсации. В общем случае уравнение (1) неправильно отражает свойства ре-

альных веществ не только в количественном, но и качественном отношении.

Любое реальное вещество в зависимости от его параметров (например, температуры и давления) может находиться в виде газовой, жидкой или твердой фазы. Процесс перехода из одной фазы в другую называется фазовым переходом. Существование таких переходов уравнением (1) не предсказывается.

На рисунке 1 изображена характерная p, T - диаграмма вещества с нанесенными на ней кривыми фазовых переходов.

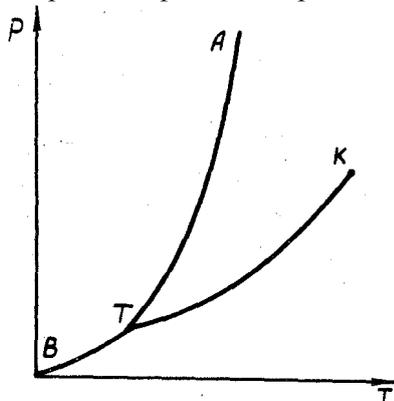


Рисунок 1 – Фазовая pT -диаграмма

Линия BT представляет собой кривую сублимации (кристаллизации) вещества, т.е. зависимость $p=f(T_c)$ для перехода твердого тела в газообразное; линия TA - кривую плавления (кристаллизации), т.е. зависимость $p=f(T_{пл})$, а линия ТК - кривую кипения (конденсации), т.е. зависимость $p=f(T_{нас})$. Кривая кипения обычно называется кривой (или линией) насыщения. Она оканчивается точкой K, называемой критической точкой. Эта точка является верхней границей двухфазной области, где возможно равновесное сосуществование жидкости и пара. Параметры вещества в этом состоянии называются критическими: критическое давление $p_{кр}$, критическая температура $T_{кр}$, критический удельный объем $v_{кр}$. Точка T - тройная точка, в которой вещество сосуществует в равновесном состоянии в трех фазах. Для воды тройная точка соответствует температуре $T=273.16$ К ($t=0.01^\circ\text{C}$) и давлению $p=0.0061$ бар. Фазовые переходы происходят постепенно, поэтому для реальных веществ существуют области, где вещество находится одновременно в двух фазах. Особенность всех фазовых переходов в том, что при постоянном давлении они протекают при неизменной температуре и для их

осуществления необходимо подвести (отвести) извне некоторое количество теплоты, которое называется теплотой фазового перехода.

На рисунке 2 приведена характерная для реальных веществ pV -диаграмма, включающая область парообразования - фазового перехода вещества из жидкости в пар. Область фазового перехода ограничена нижней ТК и верхней КЕ пограничными кривыми. Линия постоянной температуры - изотерма - представляет собой некоторую ломаную линию ABCD, имеющую прямолинейный участок BC, так как процесс парообразования (конденсации) при постоянном давлении происходит без изменения температуры. Количество теплоты, необходимое для того, чтобы при изобарном процессе перевести 1 кг вещества из состояния кипящей жидкости (точка В) в состояние сухого насыщенного пара (точка С), называется удельной теплотой парообразования r . В критической точке К теплота парообразования r равняется нулю, а свойства обеих фаз становятся тождественными.

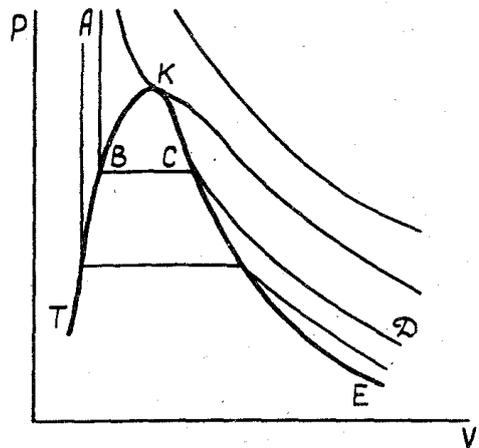


Рисунок 2 – Фазовая pV -диаграмма

Для каждого из фазовых переходов справедливо уравнение Клапейрона-Клаузиуса

$$\frac{dp}{dT} = \frac{q_{\text{фаз.пер}}}{T\Delta v} \quad (3)$$

При фазовом переходе из жидкости в пар уравнение (3) принимает вид

$$\frac{dp_{\text{нас}}}{dT_{\text{нас}}} = \frac{r}{T(v'' - v')} \quad (4)$$

где $p_{нас}$ - равновесное давление и $T_{нас}$ - равновесная температура в точках фазового перехода;
 r - удельная теплота парообразования;
 v'' - удельный объем пара на линии насыщения;
 v' - удельный объем жидкости на линии насыщения.

Поскольку плотность пара всегда меньше, чем плотность жидкости, т. е. $v'' > v'$, то из уравнения (4) следует, что для фазового перехода жидкости в пар всегда $\frac{dP_{нас}}{dT_{нас}} > 0$, т. е. с ростом температуры давление насыщения увеличивается. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса широко используется для определения термодинамических свойств веществ в области фазовых переходов.

При низких давлениях трудно экспериментально определить удельный объем сухого насыщенного пара v'' . Тогда, проводя исследование кривой насыщения, т.е. определив зависимость давления насыщения от температуры и измерив удельную теплоту парообразования r , можно рассчитать величину $v'' - v'$ по уравнению (4). При высоких же давлениях затруднено точное измерение r , и она может быть вычислена по результатам исследования кривой насыщения и удельных объемов.

Рассмотрим процесс (рис.3) изохорного нагревания вещества, причем начальное состояние процесса находится в двухфазной области. До тех пор, пока процесс протекает в двухфазной области (рис.3, а, участок $a-b$ изохоры I, участок $c-d$ изохоры II), давление вещества в каждой точке процесса равняется давлению насыщенного пара при соответствующей температуре (рис.3, б). Любой термодинамический процесс, протекающий в двухфазной области, в pT -диаграмме изображается линией, совпадающей с кривой насыщения.

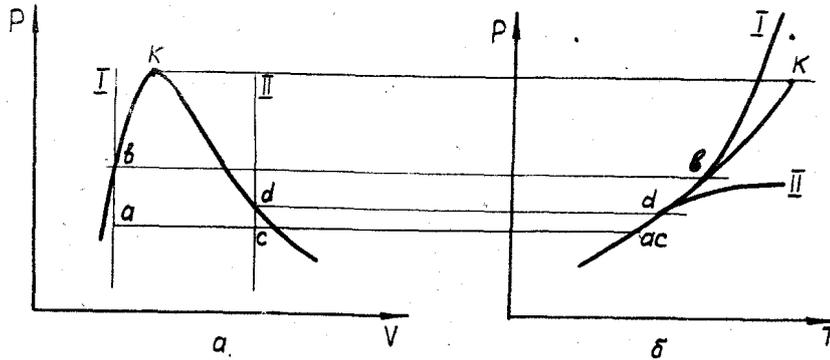


Рисунок 3. – Различные случаи изохорного нагревания вещества

Если удельный объем вещества меньше критического (рис.3, а изохора I), то изохорное нагревание приводит к полной конденсации пара, в результате чего эта изохора пересекает левую пограничную кривую.

При дальнейшем нагревании вещество будет находиться в однофазном жидком состоянии, и зависимость между температурой и давлением принимает характерный для жидкости вид - резкий рост давления при незначительном изменении температуры (рис.3, б, кривая I). Если же удельный объем вещества больше критического (рис.3, а, изохора II), то изохора пересекает правую пограничную кривую, т.е. вещество переходит в состояние перегретого пара (газа), и зависимость между температурой и давлением принимает характерный для газа вид - резкий рост температуры при незначительном изменении давления.

Таким образом, в однофазной области изохоры для значений $v < v_{кр}$ располагаются в pT -диаграмме выше и левее кривой насыщения (рис.3, б, кривая I), а для значений $v > v_{кр}$ - ниже и правее кривой насыщения.

Описание лабораторной установки

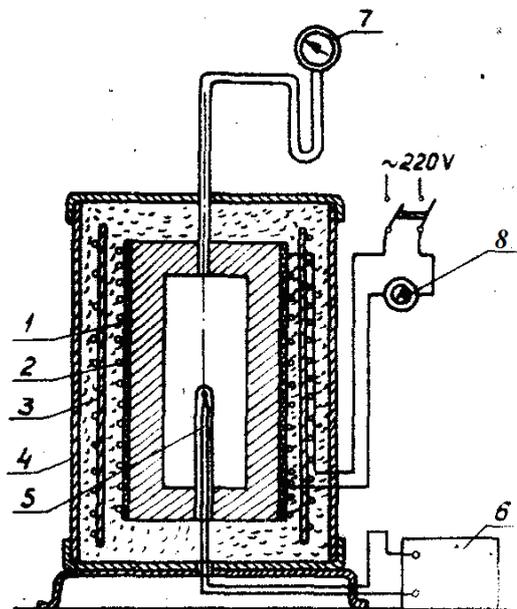


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки

На установке (рис. 4) можно определить зависимость давления от температуры исследуемого вещества в двухфазной и однофазной областях в процессе изохорического нагревания. Исследуемым веществом является вода. В каждом толстостенном сосуде 1 объемом 254 см^3 , изготовленном из нержавеющей стали, заключено некоторое количество воды. Снаружи сосуд обогревается с помощью электронагревателя 2, сделанного из нихромовой проволоки. Сосуд с нагревателем снаружи охвачен медным экраном 3 (охлаждаемым водой) и помещен в металлический кожух 4. Температура во время опыта измеряется хромель-копелевой термопарой 5.

Порядок выполнения работы

1. Для ознакомления с описанием и схемой опытной установки заготовить по образцу протокол эксперимента для записи показаний приборов.

Образец протокола эксперимента

Величины	Номера замеров															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
P в делениях																
$t_{нас}, ^\circ\text{C}$																
$T_{нас}, \text{K}$																
$p_{нас}, \text{МПа}$																
$v', \text{м}^3/\text{кг}$																
$v'', \text{м}^3/\text{кг}$																
$dp_{нас}/dT,$ $\text{Н}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$																
$r, \text{кДж}/\text{кг}$																
$r_{табл}, \text{кДж}/\text{кг}$																
$\delta r, \%$																

2. Включить электронагреватель сосуда в сеть 220 В, предварительно открыв кран подачи охлаждающей жидкости. Продолжительность нагрева до первого замера приблизительно 15-20 мин.

3. Измерить атмосферное давление p_H по барометру.

4. Записать показания образцового манометра $p_{\text{дел}}$ и потенциометра t , °С

5. При дальнейшем изменении давления и температуры запись показаний приборов вести непрерывно при изменении показаний потенциометра через 20...30°С

При проведении опыта следовало бы снимать показания приборов при равновесном состоянии, когда для каждой опытной точки температура и давление в течение некоторого периода постоянны. Однако на это нужно длительное время, поэтому, ускоряя опыт, снимают значения давлений и температур непрерывно, допуская тем самым некоторую погрешность.

Предупреждение

В зависимости от массы воды, содержащейся в сосуде, при ее нагреве может быть различным характер изменения температуры и давления (рис.3, б, кривая I и II). Предел изменения роста давления ограничен прочностью сосуда и по шкале образцового манометра определяется давлением $p=130$ атм (80 делений). Предел изменения роста температуры определяется показанием потенциометра, равным 320°С.

5. Выключить электронагреватель. После остывания сосуда закрыть кран подачи охлаждающей жидкости.

6. Результаты измерений записать в протокол.

Обработка результатов эксперимента

1. Давление насыщения в сосуде в МПа.

$$p_{\text{нас}} = p_H + p_{\text{изб}}$$

где p_H - атмосферное давление, МПа; $p_{\text{изб}}$ - избыточное давление, замеренное по показаниям образцового манометра МПа.

2. Построить в p, T -координатах кривую насыщения для воды и водяного пара от начальной температуры 100°С до критической по результатам таблицы 1. На этом же графике следует отложить и соединить плавной линией опытные точки для обеих изохор.

3. Количество воды, налитой первоначально в сосуд, в кг

$$m = \frac{\nu}{\rho}$$

где ν - объем сосуда, м³;

ϑ - удельный объем воды для изохоры I или удельный объем сухого насыщенного водяного пара для изохоры II (рис.3, б), м³/кг.

Значения удельных объемов воды v' или сухого пара v'' на линии насыщения находятся из табл.1 по температуре вещества в однофазном состоянии.

4. Удельная теплота парообразования в кДж/кг для опытных точек фазового перехода

$$r = T_{нас} (v'' - v') \frac{dp_{нас}}{dT_{нас}},$$

где $P_{нас}$ - давление насыщения, н/м²; $T_{нас}$ - температура насыщения, К; удельные объемы v'' и v' берутся из табл. 1 по температуре $t_{нас}$, °С,

м³/кг; $\frac{dp_{нас}}{dT_{нас}}$ определяется графически как тангенс угла наклона касательной к кривой насыщения, построенной в координатах p - T , в точке, для которой определяется теплота парообразования.

5. Сравнить рассчитанные значения теплоты парообразования с найденными из таблицы 1, вычислить относительную величину расхождений между ними:

$$\delta r = \frac{r_{расч} - r_{табл}}{r_{табл}} \cdot 100\% .$$

Содержание отчёта

1. Протокол эксперимента со схемой установки.
2. Графики изохорических процессов и кривой насыщения в pT -координатах.
3. Описание фазовых состояний воды и водяного пара при изохорическом процессе нагревания, когда $v < v_{кр}$ и $v > v_{кр}$ (см. рис. 3).
4. Выводы по работе.

Таблица 1. Сухой насыщенный пар и вода по кривой насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{н}}, \text{бар}$	$V', \text{м}^3/\text{кг}$	$V'', \text{м}^3/\text{кг}$	$\rho'', \text{кг}/\text{м}^3$	$r, \text{кДж}/\text{кг}$
0	0,006106	0,0010002	206,3	0,004847	2500,8
10	0,012271	0,0010004	106,42	0,009398	2477,3
20	0,02337	0,0010018	57,84	0,01729	2453,4
30	0,04241	0,0010044	32,93	0,03036	2430,0
40	0,07375	0,0010079	19,55	0,05115	2406,1
50	0,12335	0,0010121	12,05	0,08302	2382,3
60	0,1992	0,0010171	7,678	0,1302	2358,0
70	0,3116	0,0010228	5,0451	0,1982	2333,3
80	0,4736	0,0010290	3,409	0,2933	2308,2
90	0,7011	0,0010359	2,361	0,4235	2282,5
100	1,0132	0,0010435	1,673	0,5977	2256,7
110	1,4327	0,0010515	1,210	0,8263	2230,0
120	1,9854	0,0010603	0,8917	1,122	2202,7
130	2,7011	0,0010697	0,6683	1,496	2174,2
140	3,614	0,0010798	0,5087	1,966	2144,9
150	4,760	0,0010906	0,3926	2,547	2114,3
160	6,180	0,0011021	0,3068	3,259	2082,5
170	7,920	0,0011144	0,2426	4,122	2049,4
180	10,027	0,0011275	0,1939	5,157	2015,1
190	12,553	0,0011415	0,1564	6,395	1978,7
200	15,550	0,0011565	0,1272	7,863	1940,6
210	19,080	0,0011726	0,1044	9,578	1900,4
220	23,202	0,0011900	0,08606	11,62	1857,7
230	27,979	0,0012087	0,07147	13,99	1812,7
240	33,480	0,0012291	0,05967	16,76	1765,6
250	39,780	0,0012512	0,05005	19,98	1714,9

260	46,940	0,0012755	0,04215	23,72	1661,3
270	55,050	0,0013023	0,03560	28,09	1604,4
280	64,190	0,0013321	0,03013	33,19	1,542,8
290	74,450	0,0013665	0,02553	39,17	1476,3
300	85,920	0,0014036	0,02164	46,21	1404,3
310	98,690	0,001447	0,01831	54,61	1325,1
320	112,800	0,001499	0,01545	64,74	1237,6
330	128,64	0,001562	0,01297	77,09	1139,6
340	146,08	0,001639	0,01078	92,77	1091,0
350	165,37	0,001741	0,008805	113,6	893,0
360	186,74	0,001894	0,006943	144,1	719,7
370	210,53	0,00222	0,00493	202,4	438,4
374	220,87	0,002800	0,00347	288,0	114,6
374,12*	221,15*	0,003147 *	0,003147	317,76	

*Параметры критической точки.