

**О.А. БАРТЕНЕВ, В.В. МЕЗРИН
В.К. ЖУКОВ**

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА
И ТЕПЛОТЕХНИКА
ЧАСТЬ I. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРО-
ЦЕССЫ**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ НЕФТИ И ГАЗА ИМ. М.С. ГУЦЕРИЕВА

Кафедра теплоэнергетики

О.А. БАРТЕНЕВ, В.В. МЕЗРИН,
В.К. ЖУКОВ

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА
И ТЕПЛОТЕХНИКА
ЧАСТЬ I. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**



Ижевск
2019

УДК 536:62 (075.8)

ББК 31.311я73

Б262

Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом УдГУ

Рецензент: Миловзоров А.Г., к.т.н., доцент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», ИНиГ им. М.С. Гуцериева

Б54 Бартенев О.А., Мезрин В.В., Жуков В.К.. Техническая термодинамика и теплотехника. Лабораторный практикум. Часть I. Термодинамические процессы. / Под ред. канд. физ.-мат. О.А. Бартенева. – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2019. — 71 с.

В пособии достаточно детально даны методические указания по проведению лабораторных работ по разделам основных законов термодинамики, термодинамических процессов в реальных газах. Даны основные теоретические и практические сведения по изучению свойств влажного воздуха, истечения газов из сопла, исследованию свойств воды и водяного пара при протекании термодинамических процессов в этих средах, включая их протекание в теплообменных аппаратах. В настоящем издании представлены: методики проведения экспериментальных исследований термодинамических свойств реальных веществ на лабораторных установках (учебных стендах), описание проведения лабораторных измерений и обработки результатов практических испытаний.

Лабораторные работы предназначены для использования в учебном процессе для изучения теплотехнических дисциплин студентами направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», а также студентами других инженерных специальностей.

Методическое пособие разработано в соответствии с действующим федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки 13.03.01 – «Теплоэнергетика и теплотехника».

© : О.А. Бартенев, В.В.Мезрин,
В.К. Жуков, 2019

© ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», 2019

В В Е Д Е Н И Е

В настоящее время установки преобразования и передачи тепловой энергии получили столь широкое распространение, что знакомство с их работой и знание основных законов теплотехники обязательны для специалистов широкого профиля любой специальности, а для специалистов теплотехнических направлений и специалистов в области использования нетрадиционных источников энергии – в особенности. Только достаточно высокий уровень теплотехнической подготовки позволит специалисту решать задачи по созданию современных, экономически выгодных тепловых установок и находить пути повышения их энергетической эффективности.

Лабораторные исследования позволяют более глубоко понимать основные законы термодинамики и теплопередачи, принципы работы тепловых установок. Большинство лабораторных работ выполняется на стендах, созданных силами кафедры «Теплоэнергетика» УдГУ, часть работ выполняется виртуально на компьютерах по соответствующим программам.

Выполнение лабораторных работ на стендах позволяет студентам ознакомиться с приборами и методами измерения теплотехнических величин, методиками проведения экспериментов, представлять структуру технологических устройств по преобразованию и передаче тепловой энергии.

Обработка опытных данных, полученных при выполнении лабораторных работ, потребует использование таблиц теплотехнических величин и различного рода диаграмм. Некоторые таблицы и диаграммы приведены в Приложениях.

Отчет по лабораторной работе должен содержать название и цель работы, теплотехническую схему лабораторной установки, таблицы с измеренными и вычисленными величинами, причем для одного из вариантов режима работы вычисления следует подробно показать со всеми формулами и подставленными значениями величин. Также отчет должен содержать необходимые графики, сравнение полученных результатов с табличными данными или формулами, анализ возможного отклонения от теоретических формул, графиков и табличных величин. В заключении необходимо сделать выводы о проделанной работе.

В содержание лабораторных работ включены контрольные вопросы для самоподготовки, задачи, которые нужно уметь решать.

Лабораторные работы предназначены для использования в учебном процессе для изучения теплотехнических дисциплин студентами направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», а также студентами других инженерных специальностей.

Правила оформления отчета

Текстовая часть отчета должна быть написана на одной стороне листа белой бумаги формата А4 (297x210). Текст отчета печатается на принтере через полтора межстрочных интервала. Шрифт – 14, Times New Roman. Выравнивание – по ширине.

Заголовки разделов печатаются прописными буквами, шрифт 14, полужирный; подзаголовки строчными с заглавной буквы, шрифт 14, полужирный.

Текст отчета следует писать, соблюдая следующие размеры полей: левое – 30 мм, правое – 10 мм, верхнее – 20 мм, нижнее – 15 мм.

Опечатки и графические неточности, обнаруженные в отчете в процессе оформления или проверки ее руководителем практики, допускается исправлять подчисткой или закрашиванием белой специальной краской и нанесением на том же месте исправленного текста черной тушью (чернилами) рукописным или машинописным способом. При внесении поправок количество строк на странице не должно меняться. На одной странице допускается не более 5 поправок.

При написании текста отчета необходимо добиваться наиболее точного, законченного и в то же время наиболее простого и понятного построения фраз с соблюдением правил орфографии и пунктуации русского языка.

На протяжении всего текста должно строго соблюдаться единообразие терминов, обозначений, условных сокращений и символов. Не допускается применять одинаковые термины и обозначения для различных понятий без указания их смыслового значения.

При выполнении расчетов, должна использоваться только международная система единиц измерения - СИ (ГОСТ 8.417-81; СТ СЭВ 1052-78). При пользовании источниками, содержащими справочные данные в системах единиц СГС, МКГСС и др., необходимо предварительно пересчитать их в единицах СИ и уже в таком виде вводить в расчеты.

В текстовой части отчета допускаются следующие сокращения русских слов и словосочетаний согласно ГОСТ 7.12-77, ГОСТ 7.11-78 и ГОСТ 2.316-68: общепринятые сокращения словосочетаний, например: т.е. (то есть), и т.д. (и так далее), и т.п. (и тому подобное), и др. (и другие), и пр. (и прочие); буквенные аббревиатуры, например: РФ, УдГУ, ВУЗ; сокращения без гласных, например: млн., млрд; сложные термины, например: коэффициент полезного действия – КПД, центр тяжести – ц.т. (пишутся строчными буквами с точками), специальные сокращения, т.е. принятые в определенных областях науки и техники.

Не допускаются сокращения: т.к. – так как, т.н. – так называемый, т.о. – таким образом, напр. – например, ф-ла – формула, ур-е – уравнение, и др.

Сокращения, не являющиеся общепринятыми, рекомендуется применять лишь при частом повторении их в тексте. Допускается при первом

упоминании писать полное слово и в скобках – сокращенное.. В дальнейшем можно применять сокращенное их написание без скобок.

Математические знаки ($=$, $>$, $<$ и т.п.) следует применять лишь в формулах. В тексте их надо писать словами (равно, больше, меньше и т.п.). Не допускается употребление в тексте символов и условных обозначений без словесной расшифровки, например, следует писать: «температура повышается на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ », а не «Т повышается на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ».

Знаки %, sin, lg и т.д. применяют только при цифровых или буквенных величинах (45% , $\sin \alpha$, $\lg t$ и т.д.)

При изложении текста необходимо придерживаться официальной терминологии.

Текстовая часть отчета (там, где это необходимо для ясности) должна иллюстрироваться по тексту аккуратно выполненными схемами, эскизами, чертежами, фотографиями.

Эскизы, схемы и чертежи в отчете выполняются с помощью компьютера в графическом редакторе или с помощью чёрных чернил (пасты) и линейки, аккуратно, в соответствии с требованиями на выполнение эскизов.

Титульный лист, листы текста, иллюстрации, таблицы и приложения должны быть надежно сшиты и должны иметь обложку.

Рубрикация текста, нумерация страниц, содержание

Текст отчета должен разделяться на разделы, подразделы (вопросы раздела), пункты (дробные части вопросов раздела).

Каждый раздел следует начинать с нового листа (страницы), а названия должны даваться в повествовательной форме.

Разделы и подразделы нумеруются арабскими цифрами с точкой в конце. Разделы нумеруются в пределах всего отчёта, а подразделы в пределах каждого раздела. Если раздел имеет, например, номер 2, то подраздел нумеруется как 2.1. – первый подраздел второго раздела. Введение и заключение не нумеруются.

Пункты нумеруются также арабскими цифрами. В этом случае добавляется номер пункта, например: 3.1.2. – второй пункт первого подраздела третьего раздела.

Разделы, подразделы и пункты должны иметь заголовки, кратко и ясно характеризующие содержание следующего за ними текста. Заголовки разделов пишутся симметрично тексту прописными буквами; заголовки подразделов и пунктов – строчными (кроме первой прописной). В конце заголовка точку не ставят.

Подчеркивать заголовки и переносить слова в заголовках не допускается. Расстояние между заголовком и последующим текстом должно быть равно 8-10 мм, а расстояние между заголовком и последней строкой предыдущего текста (для тех случаев, когда конец одного и начало другого подразделов или пунктов размещаются на одной странице) – 15-17 мм.

Нумерация страниц отчета должна быть сквозной: первой страницей является титульный лист, второй – содержание и т.д.

Номер страницы проставляется цифрами в правом верхнем углу без точки и черточек. На первой странице (титульный лист) номер страницы не ставят. Список использованных источников и приложения необходимо включать в сквозную нумерацию.

Иллюстрации (таблицы, чертежи, схемы, графики), которые располагаются на отдельных страницах отчета, также включаются в общую нумерацию страниц. Иллюстрации, размеры которых больше формата А4, учитывают как одну страницу.

Перечисления требований, указаний, положений, содержащиеся в тексте подраздела или пункта, обозначаются арабскими цифрами со скобкой, например: 1), 2) и т.д. и записываются с абзаца.

В содержании последовательно перечисляют заголовки разделов, подразделов, пунктов и приложений и указывают номера страниц, на которых они помещены. Содержание должно включать все заголовки, имеющиеся в отчете.

Оформление иллюстраций (рисунков)

Количество иллюстраций в отчете определяется их содержанием и должно быть достаточным для того, чтобы придать излагаемому тексту ясность и конкретность.

В отчете все иллюстрации, независимо от их содержания (чертеж, схема, график, и т.д.) именуется рисунками. Рисунки нумеруются последовательно в пределах всей записки арабскими цифрами (знак № перед цифрой не ставится). Слово «рисунок» пишется на иллюстрации сокращенно, например: Рис. 2.

Графики, эскизы, диаграммы, схемы, именуемые рисунками, выполняются черной тушью, черной пастой, черными чернилами. Эскизы и схемы допускается вычерчивать в произвольном масштабе.

Все рисунки должны иметь наименование (заголовок). Наименование рисунка должно быть кратким и соответствовать содержанию. Заголовок пишется под рисунком с прописной буквы. Если рисунок имеет поясняющие данные, то их оформляют под рисуночным текстом. Номер иллюстрации располагают ниже поясняющей надписи.

В тексте при ссылках на номер рисунка его следует писать сокращенно, например: рис.5, рис.6 и т.д. Рисунки должны размещаться сразу после ссылки на них в тексте записки.

Повторные ссылки на рисунки следует давать с сокращенным словом «смотри», заключенными в круглые скобки, например: (см. рис.3)

Рисунки следует размещать так, чтобы их можно было рассматривать без поворота записки. Если такое размещение невозможно, рисунки располагают так, чтобы для их рассмотрения надо было повернуть текст

отчета по часовой стрелке. Допускается на одном листе помещать два рисунка.

На графиках экспериментальных кривых обязательно нанесение точек, соответствующих экспериментальным данным. На графиках расчетных кривых и усредненных значений такие точки не ставятся.

При оформлении рисунков не допускается переносить слова, подчеркивать и ставить точку в конце наименования (заголовка), а также писать прямо на графике обозначения кривых и прочие данные.

Оформление таблиц

Цифровой материал, помещаемый в отчет, как правило, оформляется в виде таблиц. Таблицу размещают после первого упоминания о ней в тексте отчета таким образом, чтобы ее можно было читать без поворота отчета или с поворотом по часовой стрелке. Таблицы должны нумероваться в пределах всего отчета арабскими цифрами (без знака № перед цифрой).

Надпись «Таблица» с указанием порядкового номера помещается над правым верхним углом таблицы, например: Таблица 1, Таблица 2.

Каждая таблица должна иметь содержательный заголовок. Заголовок помещают под словом «Таблица». Слово «Таблица» и заголовок начинают с прописной буквы. Заголовок не подчеркивают.

Заголовки граф таблицы должны начинаться с прописных букв и иметь размерность величин. Размерность при числах в строках таблицы не допускается. Числовые значения в одной графе должны иметь одинаковое количество десятичных знаков.

Подзаголовки граф таблицы должны начинаться со строчных букв, если они составляют продолжение заголовка, и с прописных, если они самостоятельные.

Высота строк в таблице должна быть не менее 8мм. Не следует в таблицы включать графу «№№ п.п.». Делить головку таблицы по диагонали не допускается. Если в графе текст состоит из одного слова, его допускается заменять кавычками. Если повторяющийся текст состоит из двух и более слов, то при первом повторении его заменяют словом «то же», а далее кавычками. Ставить кавычки вместо повторяющихся цифр, знаков, математических символов не допускается. Если цифровые или иные данные в какой-либо строке таблицы не приводят, то в ней ставят прочерк.

При переносе таблицы на следующую страницу отчета, заголовок таблицы следует повторить и над ней написать «Таблица 5 (продолжение)». Если заголовок таблицы громоздкий, допускается его не повторять. В этом случае пронумеровываются графы и повторяют их нумерацию на следующей странице. Заголовок таблицы не повторяют.

Таблицы с большим количеством граф допускается делить на части и помещать одна под другой в пределах одной страницы. Если строки или графы выходят за формат таблицы, то в первом случае в каждой части таблицы повторяется ее заголовок.

В отчете при ссылке на таблицу указывают ее номер и слово «Таблица» пишут в сокращенном виде, например: табл.5, табл. 5 и 6. Повторные ссылки на таблицу следует давать с сокращенным словом «смотри», например: (см. табл. 5, см. табл. 5 и 6).

Если отчет содержит один рисунок и одну таблицу, то номер им не присваивается и слово «Рис.» под рисунком и «Таблица» над таблицей не пишутся.

Оформление расчетных формул

Изложение расчетного материала рекомендуется вести от первого лица множественного числа, например: преобразуем, вычисляем, определяем и т.д. При этом может быть использована и неопределенная форма, например: принимается, определяется и т.д.

Уравнения и формулы не должны смешиваться с текстом отчета и пишутся на середине строки, а связующие их слова (следовательно, откуда, так как, или) - в начале строки.

Выше и ниже каждой формулы должно быть оставлено не менее одной свободной строки. Если формула (уравнение) не умещается в одну строку, то она переносится на следующую строку после знака (=) или после знаков (+), минус (-), умножения (x), деления (:). Эти знаки проставляются в конце одной строки и в начале следующей.

Формулы в пределах всего отчета нумеруются арабскими цифрами. Номер формулы следует заключать в скобки и помещать на правом поле, на уровне нижней строки формулы, к которой она относится. В многострочной формуле номер ставится против последней строки.

Размерность формулы (если она необходима) в скобки не заключается, отделяется от нее пробелом, например,

$$K_{np} = \frac{Q}{\Delta p_{nl}}, \text{ м}^3/\text{сут} * \text{МПа}.$$

При использовании формулы в первый раз необходимо записать ее в буквенном виде, и затем дать полную расшифровку входящих в нее величин.

Пояснение буквенных значений и символов следует проводить непосредственно под формулой в той же последовательности, в какой они даны в формуле. Первую строку объяснения начинают со слова «где», и запятую после него не ставят.

Пояснение каждого символа следует давать с новой строки, отделяя его размерность от текста запятой и заканчивая точкой с запятой. После последней расшифровки ставится точка.

Пример оформления формулы:

$$PV = mRT$$

где P - абсолютное давление, Па; T – абсолютная температура, К

R – газовая постоянная, кДж/(кг×К); V – объём газа, м³;

m – масса газа, кг.

Если формула записана в СИ, то размерность входящих в нее величин не указывается.

При подстановке в формулу числовых значений расчетных величин их размерность не указывается. Размерность должна обязательно даваться в результирующих числах. Символ и размерность одного и того же параметра должны сохраняться в пределах всего отчета.

Ранее расшифрованные величины повторно не расшифровываются. После расшифровки новых обозначений необходимо писать: «остальные величины известны из предыдущего» или «остальные величины расшифрованы ранее».

Если какая-нибудь формула используется несколько раз подряд, достаточно произвести подстановку числовых значений только один раз, а затем оговорить, что вычисления производятся аналогично, дать результаты расчетов в виде таблицы.

При использовании одной и той же формулы в разных разделах отчета не следует повторно записывать ее в общем виде. Достаточно сделать ссылку на страницу, на которой она записана впервые, или на порядковый номер формулы, например, «диаметр вычисляем по формуле (3)».

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.

Применение первого закона термодинамики при решении технических задач.

1. Цель работы.

Научиться на модельной экспериментальной установке определять потери тепла устройств в окружающую среду используя уравнения первого закона термодинамики.

Работа проводится на компьютере, режимы работы установки задаются случайным образом.

2. Краткие теоретические сведения

Первый закон термодинамики по существу является законом сохранения и превращения энергии, сформулированным для термодинамических систем. В случае отсутствия массопереноса между системой и окружающей средой его можно представить в виде применяемом для потоков рабочего тела (среды)

$$\sum_i q + \sum_j l = \Delta h + \Delta \mathcal{E}_{\text{кин}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{пот}} , \quad (1)$$

где $\sum_i q$ и $\sum_j l$ – суммарное количество теплоты и технической работы, переносимые через контрольную оболочку термодинамической системы, отнесенные к единице массы системы,

$\Delta h = h_2 - h_1$ – изменение удельной энтальпии рабочего тела,

$\Delta \mathcal{E}_{\text{кин}}$ и $\Delta \mathcal{E}_{\text{пот}}$ – изменение удельных кинетической и потенциальной энергии системы.

Другими словами, переданное термодинамической системе тепло и совершенная над ней работа расходятся на изменение ее внутренней энергии, а также кинетической и потенциальной ее энергии как целого.

В нашем случае термодинамической системой является поток воздуха.

Изменение кинетической энергии 1 кг рабочего тела

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{кин}} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} 10^{-3} , \text{ кДж/кг} \quad (2)$$

изменение потенциальной энергии 1 кг рабочего тела в поле сил тяжести

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{пот}} = g \cdot (z_2 - z_1) . \quad (3)$$

Здесь w – скорость потока газа, z – геометрическая высота от условного уровня отсчета. Индекс 1 относится к начальному состоянию рабочего тела, индекс 2 – к конечному.

3. Описание лабораторного оборудования.

Лабораторная работа выполняется на компьютере. Схема установки представлена на рис.1.

Рабочее тело (воздух) компрессором 1 в сечении I забирается из окружающей среды, сжимается и поступает в горизонтальный участок трубы 5, которая подвергается нагреву.

Напряжение и ток, потребляемый двигателем компрессора, измеряются приборами на панели 8 “Работа компрессора”.

Воздух на пути из окружающей среды в компрессор проходит через воздухомерное устройство 2 типа «труба Вентури». По существу входное устройство (труба Вентури) может рассматриваться как сопло, ускоряющее поток воздуха вследствие действия компрессора, создающего на нем разность давлений.

Количество воздуха, проходящее через установку, может изменяться с помощью заслонки 3.

Параметры окружающей среды измеряются приборами, расположенными на панели 11 “Окружающая среда” (ртутный чашечный барометр и жидкостно-стеклянный термометр). На панели 4 “Статические напоры”, расположены три U-образных манометра для измерения перепадов статического давления в сечениях: “горло” воздухомера (Н), на входе в компрессор (H_B) и за компрессором (H_H). В результате сжатия воздух, проходя от сечения I, где его температура равна температуре окружающей среды $t_1 = t_{окр}$, нагревается до температуры t_{2a} , которая измеряется термопарой 6 в комплекте с вторичным прибором в начале горизонтальной трубы 5 (сечение IIa).

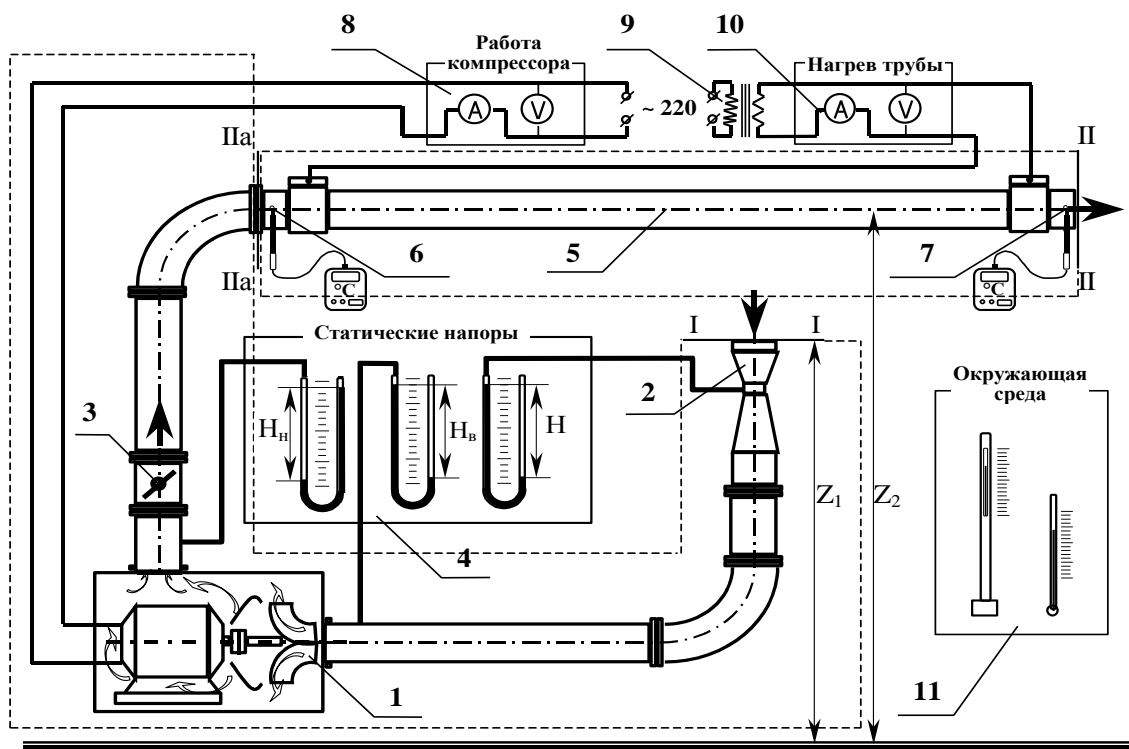


Рис.1. Схема установки.

Далее воздух поступает в горизонтальную металлическую трубу сечением $F=1.35 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, по которой протекает электрический ток, в результате чего воздух воспринимает тепло от нагретой трубы, и выводится в атмосферу в сечении II. Температура воздуха на выходе измеряется термометром 7.

Напряжение на трубу 5 подается от понижающего трансформатора 9, ток и напряжение на трубе измеряются приборами, расположенными на панели 10 “Нагрев трубы”.

В настоящем опыте всю термодинамическую систему можно разделить на два участка (две подсистемы): первый участок – от входного сечения I до сечения IIа, и второй – от сечения IIа до сечения II. Каждый из этих участков заключается в свою контрольную оболочку (на схеме показаны пунктирными линиями). На первом участке над рабочим телом совершается механическая работа, на втором – к нему подводится тепло.

В установившемся режиме теплообмена в установке внутри и с окружающим воздухом температура трубы (t_x) не меняется.

В условиях стационарного режима работы уравнение первого закона термодинамики (1) для I-го участка (подсистемы), расчетная схема которого представлена на рис.2, приобретает вид:

$$l_{э1} = h_{2a} - h_1 + \frac{w_{2a}^2 - w_1^2}{2} + g \cdot (z_{2a} - z_1) + q_{н1} \quad (4)$$

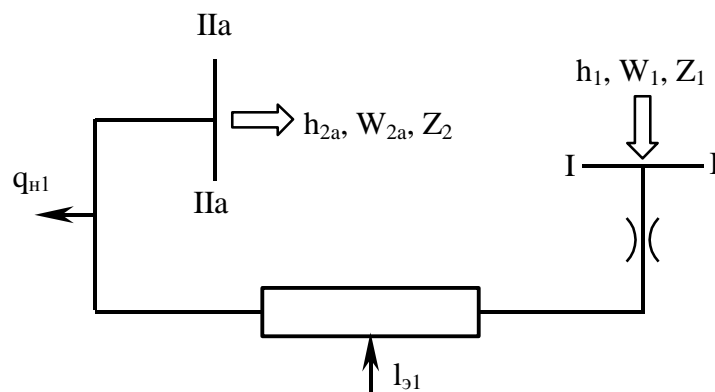


Рис.2. Расчетная схема участка I – IIа.

В настоящей работе разность уровней $(z_{2a} - z_1) = 0.4 \text{ м}$, изменение удельной потенциальной энергии составляет $\Delta \mathcal{E}_{\text{пот}} = g \cdot (z_{2a} - z_1) = 0,0039 \text{ кДж/кг}$, одинаково для всех опытов и сравнительно мало, поэтому величиной этого слагаемого в уравнении (4) можно пренебречь.

Удельную работу электрического тока двигателя компрессора можно рассчитать по формуле

$$l_{э1} = \frac{N_э}{G} = \frac{I_k \cdot U_k \cos \varphi}{G} \cdot 10^{-3}, \text{ кДж/кг} \quad (5)$$

где G – массовый расход воздуха, определяемый по формуле (13), коэффициент мощности двигателя можно принять $\cos \varphi = 0.73$.

q_{H1} – количество тепла, отдаваемое системой на первом участке в окружающую среду.

На втором участке (см. рис.3) над системой совершается работа электрического тока, нагревающего трубу, и уравнение первого закона термодинамики второго участка

$$l_{э2} = h_2 - h_{2a} + \frac{w_2^2 - w_{2a}^2}{2} + g(z_2 - z_{2a}) + q_{H2} \quad (6)$$

Здесь q_{H2} – количество тепла, отдаваемое системой на втором участке в окружающую среду, а поскольку труба – горизонтальная, $z_2 = z_{2a}$ и изменение удельной потенциальной энергии $g\Delta z_2 = 0$.

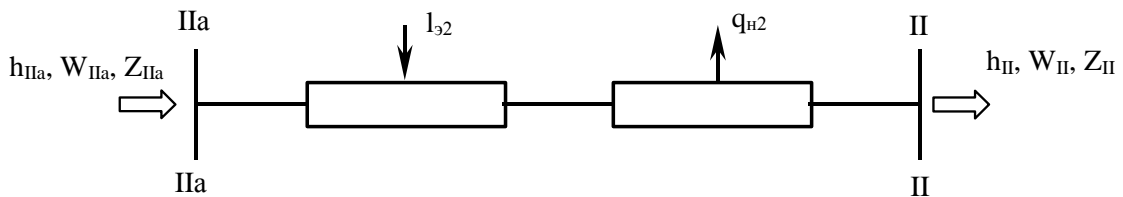


Рис.3. Расчетная схема второго участка.

Удельная работа электрического тока на втором участке

$$l_{э2} = \frac{N_H}{G} = \frac{l_H \cdot U_H}{G} \cdot 10^{-3}, \text{ кДж/кг} \quad (7)$$

поскольку нагрузка чисто активная коэффициент мощности принимаем равным 1.

Для термодинамической системы в целом уравнение первого закона термодинамики получается суммированием уравнений (4) и (6):

$$l_{э1} + l_{э2} = h_2 - h_1 + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + q_{H1} + q_{H2} \quad (8)$$

4. Порядок выполнения работы.

Лабораторная работа проводится на компьютере. Показания измерительных приборов выведены на табло.

Исходное состояние воздуха окружающей среды задается программой случайным образом. Режимы работы системы задаются степенью нагрева трубы 5 и изменением расхода воздуха с помощью заслонки 3 кнопками мыши.

4.1. Проведение эксперимента.

Для включения стенда выбрать опцию “выполнение работы”. При этом установится некоторое состояние окружающей среды.

Включить кнопкой работу компрессора и установить выбранное положение заслонки.

Включить кнопкой нагрев трубы и установить режим нагрева.

Подождать некоторое время, пока в системе не установится стационарный режим, и записать показания приборов в табл. 1. Изменить режим

работы системы с помощью заслонки и/или изменения тока нагрева трубы и произвести повторные измерения. Для изменения исходного состояния воздуха следует выбрать опцию “новый опыт”.

Показания приборов можно перенести в таблицу с помощью курсора, наведя изображение курсора в виде ручки на значение измеряемой величины.

Рекомендуется следующий порядок изменения работы системы: установить некоторый режим работы и произвести измерения, не меняя состояния окружающей среды, изменить положение заслонки,

при неизменных остальных параметрах изменить степень нагрева трубы.

Повторить подобные измерения при другом исходном состоянии атмосферного воздуха.

Проведение такого порядка опытов позволит оценить влияние изменения расхода воздуха в системе (изменение положения заслонки) и степени нагрева трубы на изменение состояния исследуемой трубы, в том числе и оценить влияние расхода воздуха на работу компрессора.

Таблица 1.

Результаты измерений.

№ п/п	измеряемая величина	обозначение	ед. измерения	Номер опыта					
				1	2	3	4	5	6
1	температура воздуха на входе (сечение I)	t_1	$^{\circ}\text{C}$						
2	температура воздуха на входе в трубу (сечение IIa)	t_{2a}	$^{\circ}\text{C}$						
3	температура воздуха на выходе из трубы (сечение II)	t_2	$^{\circ}\text{C}$						
4	показания вакуумметра (“горло” воздухомера)	H	мм вод.ст.						
5	показания пьезометра (после компрессора)	H_k	мм вод.ст.						
6	напряжение и сила тока компрессора	U_k	В						
		I_k	А						
7	напряжение и сила тока, потребляемого на нагрев трубы	U_n	В						
		I_n	А						
8	показания барометра	B	мбар						
9	температура окружающей среды	$t_{окр}$	$^{\circ}\text{C}$						
10	положение заслонки		град.						

4.2. Обработка результатов измерений.

Для каждого опыта следует рассчитать работу внешних сил l , изменение удельной кинетической энергии потока $\Delta \mathcal{E}_{кин}$, изменение энтальпии потока Δh , и определить удельные потери энергии в окружающую среду

q_n . Расчеты следует провести отдельно по участкам. Результаты расчетов свести в табл.2. Для одного из опытов расчеты представить подробно.

Таблица 2.

Термодинамические параметры системы.

№ п/п	Измеряемая величина	обозначение	ед. измерения	Номер опыта					
				1	2	3	4	5	6
1	Атмосферное давление	$p_{атм}$	Па						
2	Перепад давления воздуха в воздухомере	Δp_v	Па						
3	Давление воздуха в горле воздухомера	p_v	Па						
4	Давление воздуха на выходе из компрессора	p_{2a}	Па						
5	Плотность воздуха в горле воздухомера	ρ_v	кг/м ³						
6	Плотность воздуха в сечении IIa	ρ_{2a}	кг/м ³						
7	Плотность воздуха при выходе из трубы (сечение II)	ρ_2	кг/м ³						
8	Расход воздуха	G	кг/с						
9	Средняя скорость потока в сечении IIa	w_{2a}	м/с						
10	Средняя скорость потока при выходе из трубы (сечение II)	w_2	м/с						
11	Работа электрического тока на первом участке (подсистеме)	$l_{э1}$	кДж/кг						
12	Изменение энтальпии потока на первом участке (подсистеме)	Δh_1	кДж/кг						
13	Изменение кинетической энергии потока на первом участке (подсистеме)	$\Delta \mathcal{E}_{кин1}$	кДж/кг						
14	Количество теплоты, отдаваемое на первом участке в окружающую среду	$q_{н1}$	кДж/кг						
15	Работа электрического тока на втором участке (подсистеме)	$l_{э2}$	кДж/кг						
16	Изменение энтальпии потока на втором участке (подсистеме)	Δh_2	кДж/кг						
17	Изменение кинетической энергии потока на втором участке (подсистеме)	$\Delta \mathcal{E}_{кин2}$	кДж/кг						
18	Количество теплоты, отдаваемое на втором участке в окружающую среду	$q_{н2}$	кДж/кг						
19	Общее количество тепла, отдаваемое в окружающую среду термодинамической системой	q_n	кДж/кг						

Поскольку в настоящей работе для измерения давления окружающей среды используется ртутный барометр, требуется ввести поправку на

температурное расширение столбика ртути и атмосферное давление с учетом поправки

$$p_{\text{атм}} = \frac{B \cdot 10^2}{1 + 1,815 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{окр}}}, \text{ Па} \quad (9)$$

Перепад давления воздуха в воздухомере (строка 2)

$$\Delta p = \rho g H, \text{ Па}, \quad (10)$$

где плотность воды в U-образном вакуумметре $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Давление воздуха в сечениях системы находится по формуле

$$p_i = p_{\text{атм}} \pm \rho g H_i \quad (11)$$

Плотность воздуха в сечениях системы находится из уравнения состояния

$$\rho_i = \frac{p_i}{R(t_i + 273)}, \quad (12)$$

газовая постоянная для воздуха $R = 287 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$.

Массовый расход воздуха – через перепад давления на входном устройстве ¹

$$G = f \sqrt{\frac{2}{RT_1} p_B \cdot \Delta p_B}, \text{ кг/с}, \quad (13)$$

где площадь сечения суженной части трубки Вентури $f = 1,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Скорость потока воздуха в сечениях

$$w_i = \frac{G}{\rho_i \cdot F}, \text{ м/с}, \quad (14)$$

площадь сечения трубы одинакова на всем протяжении и равна $F = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Формулы для расчета работы электрического тока и изменения кинетической энергии приведены выше.

Значение энтальпии воздуха в характерных сечениях определяется по общему уравнению, приняв начало отсчета при 0°C

$$h_i = c_p \cdot t_i, \text{ кДж/кг}, \quad (15)$$

теплоемкость воздуха можно принять не зависящей от температуры и равной $c_p = 1,006 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Потери тепла в окружающую среду на участках рассчитать, используя формулы (4) и (6).

5. Содержание отчета.

- Название и цель работы.
- Теплотехническая схема установки.
- Таблицы измеренных данных.
- Необходимые расчеты. Расчеты для каждого режима рекомендуется свести в таблицу. При этом для одного из режимов расчеты привести с соответствующими формулами и подстановкой числовых значений.
- Выводы.

¹ Вывод формулы (13) см. Приложение 1.

6. Задачи для самостоятельного решения.

1. Рассчитайте коэффициент полезного действия компрессора в одном из опытов работы.
2. рассчитайте коэффициент полезного действия нагрева воздуха трубой, подогреваемой электрическим током на втором участке работы.
3. Паросиловая установка мощностью 4000 кВт имеет к.п.д. $\eta=0,20$. Определить часовой расход топлива, если его теплота сгорания составляет 25000кДж/кг .
4. Электрочайник мощностью 1,5 кВт нагревает 2 литра воды с начальной температурой 20°C до кипения за 10 минут. Определить потери тепла в окружающую среду.
5. Определить изменение внутренней энергии и энтальпии 1 кг воздуха при изменении его температуры от 300°C до 30°C .
6. В цилиндре с поршнем находится 0,8 кг газа. К газу подводится извне 100кДж теплоты. При этом величина произведенной работы составляет 115кДж . Определить изменение внутренней энергии газа.

Контрольные вопросы.

1. Сформулируйте цель лабораторной работы и поясните, как достигается поставленная цель?
2. Назовите основные узлы экспериментальной установки и укажите их назначение.
3. Какими методами измеряется температура в данной работе?
4. Как измеряется и регулируется расход воздуха в данной работе?
5. На что расходуется мощность, подведенная к компрессору, и как она определяется?
6. Сформулируйте и напишите аналитические выражения *первого закона термодинамики* для замкнутой и разомкнутой оболочек.
7. Каков физический смысл величин, входящих в уравнения *первого закона термодинамики*?
8. Дайте определение и поясните физический смысл понятий *теплоты* и *работы* в технической термодинамике.
9. На что и каким образом влияет изменение нагрева трубы при постоянном расходе воздуха?
10. На что расходуется мощность, подведенная для нагрева трубы, и как она определяется?
11. Как осуществляется выбор контрольных оболочек (границ) подсистем (системы) применительно к данной лабораторной работе?
12. В каком месте и почему границы подсистем (системы) размыкаются?
13. Что называется внутренней энергией рабочего тела? Свойства внутренней энергии и расчетные формулы.
14. Что называется энтальпией рабочего тела? Свойства энтальпии и расчетные формулы.

Приложение 1

Вывод формулы для расчета массового расхода газа с использованием воздухомерного устройства в лабораторной работе 1.

В качестве воздухомерного устройства в работе используется трубка Вентури, площадь сечения суженной части которой f достаточно большая, и перепад давлений в эксперименте составляет порядка 3%.

При истечении газа через суживающее сопло массовый расход находится по формуле (см. лаб. раб. 5)

$$G = \frac{fw}{v_2} = f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{v_1} \left[\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right]},$$

Здесь k – показатель адиабаты, для воздуха равный 1,4,

p_1 – давление на входе в сопло,

$\beta = \frac{p_2}{p_1}$ – отношение давлений в суженной части сопла и на входе,

v_1 – удельный объем воздуха в исходном состоянии.

Выразим давление на входе p_1 через давление в суженной части p_2 и перепад давления $p_1 = p_2 + \Delta p$. Тогда для отношения давлений можно записать

$$\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_2}{p_2 + \Delta p} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta p}{p_2}} = (1 + x)^{-1},$$

где $x = \frac{\Delta p}{p_2} \ll 1$ для нашего эксперимента.

Разложим квадратную скобку под корнем в ряд Маклорена, ограничиваясь членами первого порядка, получим $\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \approx 1 - \frac{2}{k}x - 1 + \frac{k+1}{k}x = \frac{k-1}{k} \frac{\Delta p}{p_2}$

Избавимся также от удельного объема в подкоренном выражении

$$\frac{p_1}{v_1} = \frac{p_1^2}{RT_1} = \frac{p_2^2}{RT_1} (1 + x)^2 \approx \frac{1}{RT_1} p_2^2 (1 + 2x)$$

И получаем формулу для расчета массового расхода в приближении, что перепад давлений в воздухомерном устройстве много меньше значений давления

$$G = f \sqrt{\frac{2}{RT_1} p_2^2 \left(1 + 2 \frac{\Delta p}{p_2} \right) \frac{\Delta p}{p_2}} \approx f \sqrt{\frac{2}{RT_1} p_2 \cdot \Delta p}.$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.

Экспериментальное определение удельного объема и составление таблицы термодинамических свойств двуокиси углерода.

1. Цель работы.

Практическое изучение экспериментальных методов определения термодинамических свойств реальных веществ на примере двуокиси углерода и составление таблиц параметров состояния.

2. Краткие теоретические сведения

Уравнение состояния идеального газа $pv = RT$ с хорошей степенью точности описывает состояние большинства газов. Однако, для некоторых реальных газов, молекулы которых помимо упругого столкновения испытывают другие виды взаимодействия, что особенно характерно для полярных молекул, применение этого уравнения дает существенные ошибки.

Для реальных газов предложено несколько форм уравнения состояния:

уравнение Ван-дер-Ваальса в первом приближении

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad (1)$$

или в виде

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}, \quad (1')$$

константы, входящие в это уравнение имеют для CO_2 следующие значения: $a=109.9 \text{ Н}\cdot\text{м}^4/\text{кг}^2$, $b=0.000984 \text{ м}^3/\text{кг}$;

уравнение в вириальной форме, ограничиваясь вторым вириальным коэффициентом B' , зависящим от температуры

$$z = \frac{pv}{RT} = 1 + B'p \quad (2)$$

Для составления таблиц термодинамических параметров реальных газов следует провести ряд измерений давления и удельного объема при различных температурах (см. табл.1 и 2 в Приложении).

3. Описание лабораторного оборудования.

Схема лабораторного стенда для измерения параметров углекислого газа показана на рис.1. В стеклянном капилляре 1, выдерживающем давление до 100 бар и запаянном сверху, находится двуокись углерода. Нижний конец капилляра соединен с колбой 13, помещенной в стальной сосуд с ртутью 14. Для предотвращения испарения ртуть сверху залита маслом 16, через которое на ртуть и исследуемое вещество в капилляре передается давление, создаваемое прессом 12.

Для обеспечения постоянства температуры исследуемого вещества капилляр 1 помещен в резервуар 2, через который циркулирует вода, поступающая из термостата 15.

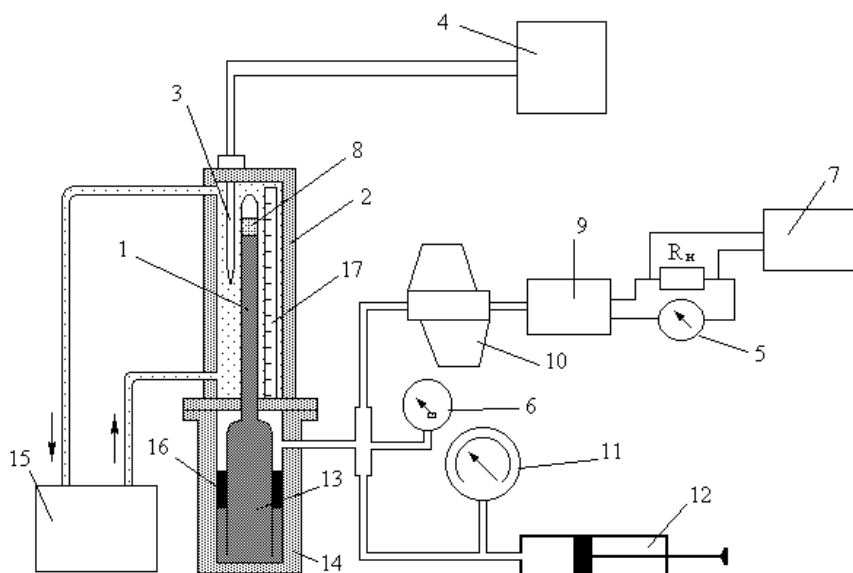


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – стеклянный капилляр; 2 – резервуар из плексигласа; 3 – термопреобразователь; 4 – пирометрический милливольтметр Ц4540; 5 – миллиамперметр М381; 6 – электроконтактный манометр ЭКМ-2У; 7 – цифровой вольтметр; 8 – капля CO_2 ; 9 – усилитель УПТ; 10 – датчик давления МПЭ-МИ; 11 – образцовый манометр; 12 – пресс масляный; 13 – колба со ртутью; 14 – стальной сосуд; 15 – термостат; 16 – масло; 17 – линейка

Давление, создаваемое поршнем прессы 12, по гидроприводу передается на ртуть и на исследуемый газ. Избыточное давление в системе измеряется образцовым манометром 11 и электроконтактным манометром 6. Абсолютное давление в системе измеряется посредством мембранного датчика давления 10, сигнал с которого через усилитель постоянного тока 9 подается на резистор R_k , сопротивление которого подобрано так, чтобы величина напряжения на резисторе численно была равна абсолютному давлению в системе, выраженному в барах. Значение напряжения на резисторе измеряется цифровым вольтметром (мультиметром). Эти показания дублируются измерением тока миллиамперметром 5 в цепи резистора с учетом его градуировочной кривой.

Ручка поршня находится на лицевой панели стенда.

Внимание! С целью исключения превышения давления в капилляре свыше 70 бар, на стенде предусмотрена световая индикация перегрузки с использованием электроконтактного манометра ЭКМ-2У.

Температура воды в резервуаре 2 измеряется с помощью термопреобразователя 3, выходной сигнал с которого подается на милливольтметр 4, проградуированный в градусах Цельсия.

Как следует из таблицы 1 Приложения, для достижения состояния насыщения углекислого газа при комнатной температуре требуется давление порядка 70 бар, каковое является предельным для лабораторной установки. Поэтому эксперименты проводятся при температурах ниже комнат-

ной, которая достигается помещением в бак термостата 15 льда. Охлажденная вода по трубопроводу подается в резервуар, включение насоса производится тумблером “подача воды”. Эксперимент начинают при наиболее низкой температуре воды, Электрический подогрев воды в баке производится включением тумблера “нагрев воды”.

Для измерения объема двуокиси углерода в капилляре рядом с ним расположена линейка с нулевой отметкой на вершине капилляра. Внутренний диаметр капилляра $d_{вн}=2\text{мм}$.

4. Порядок выполнения работы.

4.1. Подготовка стенда к работе.

Перед выполнением работы необходимо в бак 15 загрузить лед для понижения температуры воды в термостате.

Тумблером на лицевой панели включить электропитание стенда и убедиться, что используемые электроизмерительные приборы также включились и показывают следующие значения: цифровой мультиметр – давление, равное атмосферному, милливольтметр Щ4540 – температуру воды в системе, равную температуре окружающей среды.

Показания приборов сверить с показаниями барометра и термометра в лаборатории.

Включить подачу воды в резервуар, в котором находится капилляр. Поскольку в баке находится охлажденная вода, температура в резервуаре станет понижаться. При достижении минимального значения температуры произвести собственно лабораторные измерения.

4.2. Проведение эксперимента.

Проведение эксперимента состоит в измерении высоты столба углекислого газа в капилляре при различных давлениях и постоянной температуре.

В процессе сжатия при низких давлениях исследуемое вещество находится в газообразном состоянии, при давлении, равном давлению насыщения, образуется жидкая фаза, по мере увеличения давления, количество жидкой фазы возрастает и при некотором давлении получаем только жидкую фазу.

Первоначальное давление следует установить порядка 6 – 10 бар таким образом, чтобы уровень ртути в капилляре был на нижней отметке мерительной линейки. При повышении давления столбик ртути в капилляре будет подниматься.

Пока двуокись углерода находится в газообразном состоянии, измерения давления и отметки ртути следует проводить через 15 – 20 мм шкалы линейки, в области влажного пара – через 3 – 5 мм, а в области жидкости, где объем при сжатии меняется очень мало, измерения прово-

дятся через 10 бар. При достижении давления 70 бар, эксперимент прекращают и снижают давление до минимального.

Значения давления и длины капилляра, занятой исследуемым веществом записывают в табл.1. В таблице в обязательном порядке отметить давления начала и окончания конденсации двуокиси углерода.

Таблица 1.

Изменение удельного объема CO_2 в зависимости от давления.

температура $^{\circ}\text{C}$	измерено		вычислено		
	давление p , <i>бар</i>	отметка капилляра l , <i>мм</i>	удельный объем v , $\text{м}^3/\text{кг}$	давление p по формуле (1'), <i>бар</i>	коэффициент сжимаемости $z = \frac{pv}{RT}$
1	3	4	4	5	6
t_1					
t_2					
t_3					
t_4					
t_5					

Подобным образом произвести измерения при других температурах. Для повышения температуры воды термостата включить подогрев тумблером “нагрев воды”, не прекращая ее циркуляцию, дождаться повышения температуры воды примерно на 5 градусов, выключить нагрев, убедиться температуре в системе остается неизменной, произвести подобные измерения, данные занести в табл.1.

4.3. Обработка результатов эксперимента.

4.3.1. Построение изотерм в координатах p - v .

Так как количество исследуемого вещества в капилляре m неизменно, то в каждом равновесном состоянии удельный объем

$$v = \frac{V}{m} = \frac{F \cdot l}{m} = k \cdot l, \quad (3)$$

где V – объем, занимаемый окисью углерода,

F – площадь поперечного сечения капилляра,

l – длина капилляра, занятого окисью углерода, мм,

$k = \frac{F}{m}$ – постоянная эксперимента, $(\text{м}^3/\text{кг})/\text{мм}$.

Значение постоянной k можно определить по изотерме при небольшом давлении 6 – 10 бар, когда исследуемое вещество находится в газообразном состоянии, используя данные табл.2 Приложения. По таблице, зная температуру и давление, определяем удельный объем и значение константы

$$k = \frac{v_{\text{табл}}}{l_{\text{изм}}} \quad (4)$$

Расчет постоянной k следует произвести по первым точкам каждой из изотерм и в дальнейшем использовать ее среднее значение, результаты расчета свести в табл.2

Таблица 2.

Расчет постоянной k

Измерено			По табл.1	вычислено
температура, °C	давление, бар	отметка ка- пилляра, мм	удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$	постоянная k , $(\text{м}^3/\text{кг})/\text{мм}$
Среднее				

Расчет удельного объема в табл.1 производится по формуле (3).

По рассчитанным значениям удельного объема и измеренным давлениям для всех равновесных состояний построить изотермы в $p - v$ – диаграмме. Для сверхкритической температуры построить изотерму идеального газа CO_2 и сравнить ее с полученной в опыте. Также на диаграмму нанести пограничные кривые для CO_2 по данным табл.1 Приложения.

4.3.2. Сравнение удельных объемов и вычисление теплоты парообразования.

Используя расчет давления по формуле (1') – столбец 5 табл.1, построить изотермы Ван-дер-Ваальса в p - v -координатах. При расчете для докритической изотермы T_1 особое внимание обратить на расчет характерной для уравнения Ван-дер-Ваальса “петли” в области между левой и правой пограничными кривыми.

Обе изотермы Ван-дер-Ваальса построить на $p - v -$ диаграмме.

Используя данные табл. 1 Приложения построить кривую насыщения в p - T – координатах и для температуры T_1 рассчитать величину теплоты парообразования r , используя уравнение Клайперона-Клаузиуса

$$r = T(v'' - v') \frac{dp_H}{dT_H} \quad (5)$$

Необходимые для расчета значения удельных объемов можно взять из p - v – диаграммы, построенной по данным опыта, а производная $\frac{dp_H}{dT_H}$ определяется по p - T – диаграмме как тангенс угла наклона касательной к кривой насыщения при температуре T_1 . Вычисленное значение теплоты парообразования сравнить с табличным.

4.3.3. Составление уравнения состояния и расчет таблиц термодинамических свойств двуокиси углерода.

В уравнении состояния в вириальной форме (2) второй вириальный коэффициент B' зависит от температуры, поэтому он должен быть определен для каждого опыта. Для определения значения коэффициента B' следует построить изотермы $z(p)$, используя значения величин табл.1, продолжить их до значения $p = 0$ и определить тангенс угла наклона касательной изотермы $z(p)$ в точке $p = 0$ (см. рис.2)

$$B' = \left. \frac{\partial z}{\partial p} \right|_{T=const, p \rightarrow 0} = \frac{\Delta z}{\Delta p} \quad (6)$$

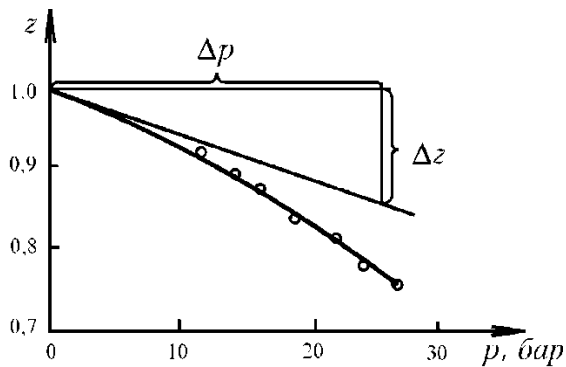


Рис.2. Определение второго вириального коэффициента B' .

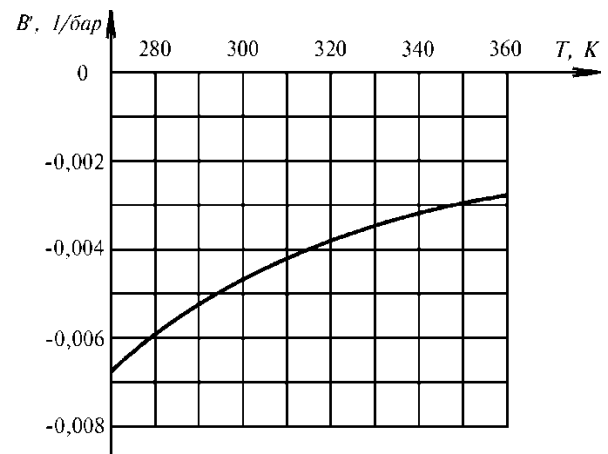


Рис.3. Зависимость второго вириального коэффициента для CO_2 от температуры.

Значения коэффициентов B' определить для всех значений температуры, при которых проводились опыты. Полученные значения следует сравнить со значениями графика рис. 3.

Аналитический вид второго вириального коэффициента B' целесообразно принять таким:

$$B' = \frac{b_1}{T} - \frac{b_2}{T^2}, \quad (7)$$

что соответствует форме температурной зависимости второго вириального коэффициента в уравнении Ван-дер-Ваальса.

Составив систему линейных уравнений (7) для разных температур T_1 и T_3 по известным значениям $B'(T)$, легко определить значения констант b_1 и b_2 .

4.3.4. Оценка точности экспериментального определения удельного объема.

Максимальная относительная погрешность определения удельного объема δv методом, описанным в настоящей работе, может быть вычислена следующим способом.

Для расчетной формулы (1) имеем (см. табл. 4.24 в [2])

$$\delta v = \delta k + \delta l,$$

где δk и δl – относительные ошибки определения постоянной установки k и величины l в данном состоянии.

В свою очередь, имея в виду равенство (4), можно записать

$$\delta k = \delta v_{\text{табл}} + \delta l_{\text{нач}}$$

где $\delta v_{\text{табл}}$ – относительная ошибка табличных значений удельного объема, используемых при определении постоянной установки, она равна 0,2% в узле таблицы и может возрастать до 1% в состояниях между узлами при применении линейной интерполяции,

$\delta l_{\text{нач}}$ – относительная ошибка измерения длины капилляра в состоянии, используемом для расчета постоянной установки.

Тогда:

$$\delta v = \delta v_{\text{табл}} + \delta l_{\text{нач}} + \delta l ,$$

откуда видно, что относительная ошибка определения объема относительным методом не может быть меньше относительной ошибки табличных значений удельного объема при низком давлении.

Полная относительная ошибка определения удельного объема с учетом ошибок отнесения составит

$$\delta v^{\text{пол}} = \delta v + \delta v^{\text{отн}}, \quad (8)$$

где $\delta v^{\text{отн}}$ – ошибка отнесения, рассчитываемая по формуле

$$\delta v^{\text{отн}} = \left| \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \Delta T \right| + \left| \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \Delta p \right|, \quad (9)$$

где ΔT - абсолютная ошибка измерения температуры;

Δp - абсолютная ошибка измерения давления.

Используя формулу (8) для одного из экспериментальных значений удельного объема, рассчитать максимальную относительную погрешность. Необходимые значения производных $(\partial v / \partial T)_p$ и $(\partial v / \partial p)_T$ оценить по таблицам термодинамических свойств двуокиси углерода (Приложение 2).

5. Содержание отчета.

- Название и цель работы.
- Принципиальная схема установки и краткое описание.
- Таблицы измеренных данных.
- Расчет коэффициента пропорциональности k , численных значений удельных объемов CO_2 и коэффициентов сжимаемости z .
- p, v -диаграмму CO_2 с исследованными в эксперименте изотермами, пограничными кривыми, изотермой идеального газа CO_2 , рассчитанной для сверхкритической температуры, двумя изотермами Ван-дер-Ваальса, рассчитанными в п. 4.3.2.
- Расчет погрешности экспериментальных данных.
- Выводы.

Контрольные вопросы.

1. Каков физический смысл поправок a/v^2 и b в уравнении Ван-дер-Ваальса?
2. Каким образом можно найти давление насыщения при данной температуре с помощью уравнения Ван-дер-Ваальса?
3. Как изменяется давление при равновесном сжатии (при $T = \text{const}$), если сжатие происходит в двухфазной области?

4. Известна величина химического потенциала в состоянии сухого насыщенного пара при температуре T . Как из этого условия найти химический потенциал жидкости на левой пограничной кривой при той же температуре?

5. Что, кроме уравнения состояния, еще необходимо знать для получения формулы расчета энтальпии?

6. Вид вириального уравнения состояния и зависимость второго вириального коэффициента от температуры.

7. Каким образом из формулы (8) описания получается формула (9)? Представить вывод.

8. Что такое температура Бойля для реального газа?

9. Может ли энтальпия газа увеличиваться с увеличением давления (при $T = \text{const}$) или она всегда должна уменьшаться с ростом давления?

Таблица 1

Термодинамические свойства двуокиси углерода

в состоянии насыщения [6]

Т, К	р, бар	Удельный объем, м ³ /кг		Энтальпия, кДж/кг		Теплота парообра- зования, кДж/кг
		υ'	υ''	h'	h''	
270	32,01	0,0010591	0,011337	494,9	735,7	240,8
272	33,77	0,0010716	0,010642	499,6	734,7	235,1
274	35,61	0,0010855	0,0099880	504,5	733,6	229,1
276	37,52	0,0011004	0,0093694	509,4	732,3	222,8
278	39,50	0,0011162	0,0087839	514,5	730,8	216,3
280	41,57	0,0011331	0,0082284	519,7	729,1	209,5
282	43,71	0,0011514	0,0077006	525,0	727,3	202,3
284	45,94	0,0011714	0,0071974	530,4	725,1	194,7
286	48,26	0,0011930	0,0067159	536,0	722,7	186,6
288	50,66	0,0012171	0,0062543	541,9	719,9	178,0
290	53,16	0,0012439	0,0058089	547,9	716,7	168,8
292	55,75	0,0012744	0,0053772	554,3	713,0	158,7
294	58,45	0,0013096	0,0049552	561,1	708,7	147,6
295	59,83	0,0013294	0,0047463	564,6	706,2	141,6
296	61,24	0,0013512	0,0045378	568,3	703,5	135,2
297	62,67	0,0013751	0,0043288	572,2	700,5	128,3
298	64,14	0,0014021	0,0041179	576,3	697,1	120,8
299	65,63	0,0014329	0,0039035	580,7	693,3	112,7
300	67,14	0,0014686	0,0036826	585,4	689,0	103,6
301	68,69	0,0015113	0,0034510	590,5	683,8	93,2
302	70,26	0,0015647	0,0032005	596,4	677,3	80,9
303	71,87	0,0016369	0,0029119	603,4	668,7	65,3
304,2	73,83	0,002137		634,0		0

Таблица 2

Удельный объем v , м³/кг и энтальпия h , кДж/кг,
двуокиси углерода в однофазной области [6]

Т, К	v, h	Давление p , бар						
		0	5	5,5	6	6,5	7	7,5
275	v	—	0,1004	0,0910	0,0831	0,0764	0,0707	0,0657
	h	790,04	784,4	783,8	783,2	782,6	782,1	781,5
276	v	—	0,1008	0,0913	0,0834	0,0767	0,0710	0,0660
	h	790,86	785,3	784,7	784,1	783,5	782,9	782,4
278	v	—	0,1016	0,0921	0,0841	0,0774	0,0716	0,0666
	h	792,50	787,0	786,4	785,9	785,3	784,7	784,1
280	v	—	0,1025	0,0928	0,0848	0,0780	0,0722	0,0672
	h	794,15	788,7	788,2	787,6	787,1	786,5	785,9
282	v	—	0,1033	0,0936	0,0855	0,0787	0,0728	0,0677
	h	795,80	790,5	789,9	789,4	788,8	788,3	787,7
284	v	—	0,1041	0,0943	0,0862	0,0793	0,0734	0,0683
	h	797,46	792,2	791,7	791,1	790,6	790,0	789,5
286	v	—	0,1049	0,0951	0,0869	0,0799	0,0740	0,0688
	h	799,12	794,0	793,4	792,9	792,4	791,8	791,3
288	v	—	0,1057	0,0958	0,0876	0,0806	0,0746	0,0694
	h	800,79	795,7	795,2	794,7	794,1	793,6	793,1
290	v	—	0,1065	0,0965	0,0882	0,0812	0,0752	0,0700
	h	802,46	797,5	796,9	796,4	795,9	795,4	794,9
292	v	—	0,1073	0,0973	0,0889	0,0818	0,0758	0,0705
	h	804,13	799,2	798,7	798,2	797,7	797,2	796,7
294	v	—	0,1081	0,0980	0,0896	0,0825	0,0764	0,0711
	h	805,81	801,0	800,5	800,0	799,5	798,9	798,4
296	v	—	0,1089	0,0987	0,0903	0,0831	0,0769	0,0716
	h	807,49	802,7	802,2	801,7	801,2	800,7	800,2
298	v	—	0,1097	0,0995	0,0909	0,0837	0,0775	0,0722
	h	809,18	804,5	804,0	803,5	803,0	802,5	802,0
300	v	—	0,1105	0,1002	0,0916	0,0843	0,0781	0,0727
	h	810,87	806,2	805,7	805,3	804,8	804,3	803,8
302	v	—	0,1113	0,1009	0,0923	0,0850	0,0787	0,0733
	h	812,56	808,0	807,5	807,0	806,6	806,1	805,6
304	v	—	0,1121	0,1017	0,0930	0,0856	0,0793	0,0738
	h	814,26	809,7	809,3	808,8	808,3	807,9	807,4
306	v	—	0,1129	0,1024	0,0936	0,0862	0,0799	0,0744
	h	815,96	811,5	811,0	810,6	810,1	809,7	809,2
308	v	—	0,1137	0,1031	0,0943	0,0868	0,0804	0,0749
	h	817,67	813,2	812,8	812,4	811,9	811,4	811,0
310	v	—	0,1145	0,1039	0,0950	0,0875	0,0810	0,0754
	h	819,38	815,0	814,6	814,1	813,7	813,2	812,8
312	v	—	0,1153	0,1046	0,0956	0,0881	0,0816	0,0760
	h	821,09	816,8	816,3	815,9	815,5	815,0	814,6
315	v	—	0,1165	0,1057	0,0966	0,0890	0,0825	0,0768
	h	823,67	819,5	819,0	818,6	818,2	817,7	817,3

Т,К	v, h	Давление p, бар						
		8	8,5	9	9,5	10	12	15
275	v	0,0614	0,0576	0,0542	0,0511	0,0484	0,0397	0,0309
	h	780,9	780,2	779,6	779,0	778,4	775,9	771,9
276	v	0,0617	0,0578	0,0544	0,0514	0,0486	0,0399	0,0311
	h	781,8	781,2	780,5	779,9	779,3	776,8	772,9
278	v	0,0622	0,0583	0,0549	0,0518	0,0490	0,0402	0,0314
	h	783,6	783,0	782,4	781,8	781,2	778,7	774,9
280	v	0,0627	0,0588	0,0554	0,0523	0,0495	0,0406	0,0318
	h	785,4	784,8	784,2	783,6	783,0	780,6	776,9
282	v	0,0633	0,0593	0,0558	0,0527	0,0499	0,0410	0,0321
	h	787,1	786,6	786,0	785,4	784,9	782,5	778,8
284	v	0,0638	0,0598	0,0563	0,0532	0,0504	0,0414	0,0324
	h	788,9	788,4	787,8	787,3	786,7	784,4	780,8
286	v	0,0643	0,0603	0,0568	0,0536	0,0508	0,0418	0,0327
	h	790,8	790,2	789,7	789,1	788,5	786,3	782,8
288	v	0,0649	0,0608	0,0573	0,0541	0,0512	0,0421	0,0330
	h	792,5	792,0	791,5	790,9	790,4	788,2	784,7
290	v	0,0654	0,0613	0,0578	0,0545	0,0517	0,0425	0,0333
	h	794,3	793,8	793,3	792,7	792,2	790,0	786,7
292	v	0,0659	0,0618	0,0582	0,0550	0,0521	0,0429	0,0336
	h	796,1	795,6	795,1	794,6	794,0	791,9	788,6
294	v	0,0664	0,0623	0,0587	0,0554	0,0525	0,0432	0,0339
	h	797,9	797,4	796,9	796,4	795,9	793,8	790,5
296	v	0,0669	0,0628	0,0592	0,0559	0,0529	0,0436	0,0342
	h	799,7	799,2	798,7	798,2	797,7	795,6	792,5
298	v	0,0675	0,0633	0,0596	0,0563	0,0534	0,0440	0,0345
	h	801,5	801,0	800,5	800,0	799,5	797,5	794,4
300	v	0,0680	0,0638	0,0601	0,0568	0,0538	0,0443	0,0349
	h	803,3	802,8	802,4	801,9	801,4	799,4	796,3
302	v	0,0685	0,0643	0,0606	0,0572	0,0542	0,0447	0,0352
	h	805,1	804,6	804,2	803,7	803,2	801,2	798,2
304	v	0,0690	0,0648	0,0610	0,0577	0,0546	0,0451	0,0355
	h	806,9	806,5	806,0	805,5	805,0	803,1	800,1
306	v	0,0695	0,0653	0,0615	0,0581	0,0551	0,0454	0,0358
	h	808,7	808,3	807,8	807,3	806,9	805,0	802,0
308	v	0,0700	0,0658	0,0620	0,0586	0,0555	0,0458	0,0360
	h	810,5	810,1	809,6	809,2	808,7	806,8	803,9
310	v	0,0706	0,0663	0,0624	0,0590	0,0559	0,0161	0,0363
	h	812,3	811,9	811,4	811,0	810,5	808,7	805,9
312	v	0,0711	0,0667	0,0629	0,0594	0,0563	0,0465	0,0366
	h	814,1	813,7	813,3	812,8	812,4	810,5	807,8
315	v	0,0718	0,0675	0,0636	0,0601	0,0570	0,0470	0,0371
	h	816,9	816,4	816,0	815,6	815,1	813,3	810,6

Т, К	v, h	Давление p, бар						
		20	30	40	50	60	70	80
275	v	0,0222	0,0132	0,00109	0,00108	0,00107	0,00106	0,00105
	h	764,9	747,9	506,5	505,5	504,5	503,8	503,1
276	v	0,0223	0,0133	0,00110	0,00109	0,00108	0,00107	0,00106
	h	766,0	749,3	509,1	507,9	507,0	506,1	505,4
278	v	0,0226	0,0135	0,00112	0,00110	0,00109	0,00108	0,00107
	h	768,1	752,1	514,4	513,0	511,8	510,9	510,0
280	v	0,0228	0,0137	0,00884	0,00112	0,00111	0,00109	0,00108
	h	770,3	754,8	733,6	518,3	516,9	515,7	514,7
282	v	0,0231	0,0140	0,00909	0,00114	0,00112	0,00111	0,00110
	h	772,4	757,4	737,4	523,7	522,1	520,7	519,6
284	v	0,0234	0,0142	0,00932	0,00116	0,00114	0,00113	0,00111
	h	774,5	760,0	741,1	529,5	527,5	525,8	524,5
286	v	0,0236	0,0144	0,00954	0,00119	0,00117	0,00115	0,00113
	h	776,6	762,5	744,6	535,5	533,1	531,2	529,6
288	v	0,0239	0,0146	0,00975	0,00646	0,00119	0,00117	0,00115
	h	778,7	765,0	747,9	722,3	539,0	536,7	534,8
290	v	0,0241	0,0148	0,00995	0,00673	0,00122	0,00119	0,00117
	h	780,7	767,5	751,1	727,8	545,3	542,4	540,2
292	v	0,0244	0,0150	0,0101	0,00697	0,00125	0,00122	0,00119
	h	782,8	769,9	754,2	732,7	552,2	548,5	545,9
294	v	0,02461	0,0152	0,0103	0,00720	0,00130	0,00125	0,00122
	h	784,9	772,3	757,1	737,1	560,0	5551	5518
296	v	0,0249	0,0154	0,0105	0,00740	0,00489	0,00129	0,00125
	h	786,9	774,6	760,1	7413	710,3	562,3	5581
298	v	0,0251	0,0156	0,0107	0,00760	0,00521	0,00134	0,00128
	h	788,9	777,0	762,9	745,1	718,3	570,5	564,8
300	v	0,0253	0,0158	0,0109	0,00778	0,00547	0,00142	0,00133
	h	791,0	779,3	765,7	748,8	724,8	580,7	572,2
302	v	0,0256	0,0160	0,0110	0,00796	0,00570	0,00333	0,00138
	h	793,0	781,6	768,4	752,3	730,5	681,6	580,7
304	v	0,0258	0,0161	0,0112	0,00813	0,00591	0,00391	0,00146
	h	795,0	783,8	771,0	755,7	735,5	700,6	591,0
306	v	0,0261	0,0163	0,0114	0,00829	0,00610	0,00425	0,00161
	h	797,0	786,1	773,7	758,9	740,2	711,2	605,9
308	v	0,0263	0,0165	0,0115	0,00845	0,00628	0,00451	0,00225
	h	799,0	788,3	776,2	762,1	744,5	719,2	648,1
310	v	0,0265	0,0167	0,0117	0,00861	0,00645	0,00474	0,00302
	h	801,0	790,5	778,8	765,2	748,5	725,8	683,3
312	v	0,0268	0,0169	0,0118	0,00876	0,00661	0,00494	0,00341
	h	803,0	792,7	781,3	768,1	752,3	731,7	698,6
315	v	0,0271	0,0171	0,0121	0,00897	0,00683	0,00520	0,00382
	h	806,0	796,0	785,0	772,5	757,8	739,4	713,4

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.

Исследование зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры.

1. Цель работы.

Опытное определение зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры статическим методом.

2. Краткие теоретические сведения

К водяному пару нельзя применять уравнения идеального газа, поскольку молекула воды обладает сильным дипольным моментом, и в газообразном состоянии помимо упругого столкновения одновременно происходят явления ассоциации и диссоциации молекул. В общем виде уравнение состояния реальных газов записывается в форме ограниченного ряда

$$pv = RT \left(1 - A \frac{1}{v} - B \frac{1}{v^2} + \dots \right). \quad (1)$$

Для коэффициентов A и B предложены достаточно сложные формулы, в которые входят температура, газовая постоянная и константы реальных газов, которые рассчитаны и представлены в таблицах.

Практическое применение уравнения (1) в непосредственном виде затруднено, но с его помощью для некоторых реальных газов, в частности, для перегретого пара, вычислены основные физические величины при различных p и T , составлены таблицы и построена диаграмма в hs -координатах (рис. 1).

Водяной пар может быть насыщенным и перегретым. В двухфазной системе пар – жидкость при термодинамическом равновесии пар имеет максимальную плотность и называется насыщенным. Основное свойство этого пара состоит в том, что его температура однозначно определяется его давлением, равным давлению той среды, в которой происходит процесс кипения (конденсации). Поэтому температура кипения или конденсации иначе называется температурой насыщения t_n , давление, соответствующее t_n , называется давлением насыщения.

Насыщенный пар разделяется на сухой и влажный. Влажный пар представляет собой двухфазную смесь сухого пара с кипящей жидкостью. Относительная массовая доля сухого пара во влажном называется степенью сухости и обозначается x .

Пар, температура которого выше температуры насыщенного пара того же давления, называется перегретым. На диаграмме для водяного пара перегретый пар и насыщенный разделяются линией насыщения при $x=1$, выше этой линии изолинии температуры и давления уже не совпадают.

Таким образом, для насыщенного пара имеет место однозначная зависимость давления пара от его температуры (см. Приложение 1), экспериментальное определение этой зависимости и является целью настоящей лабораторной работы.

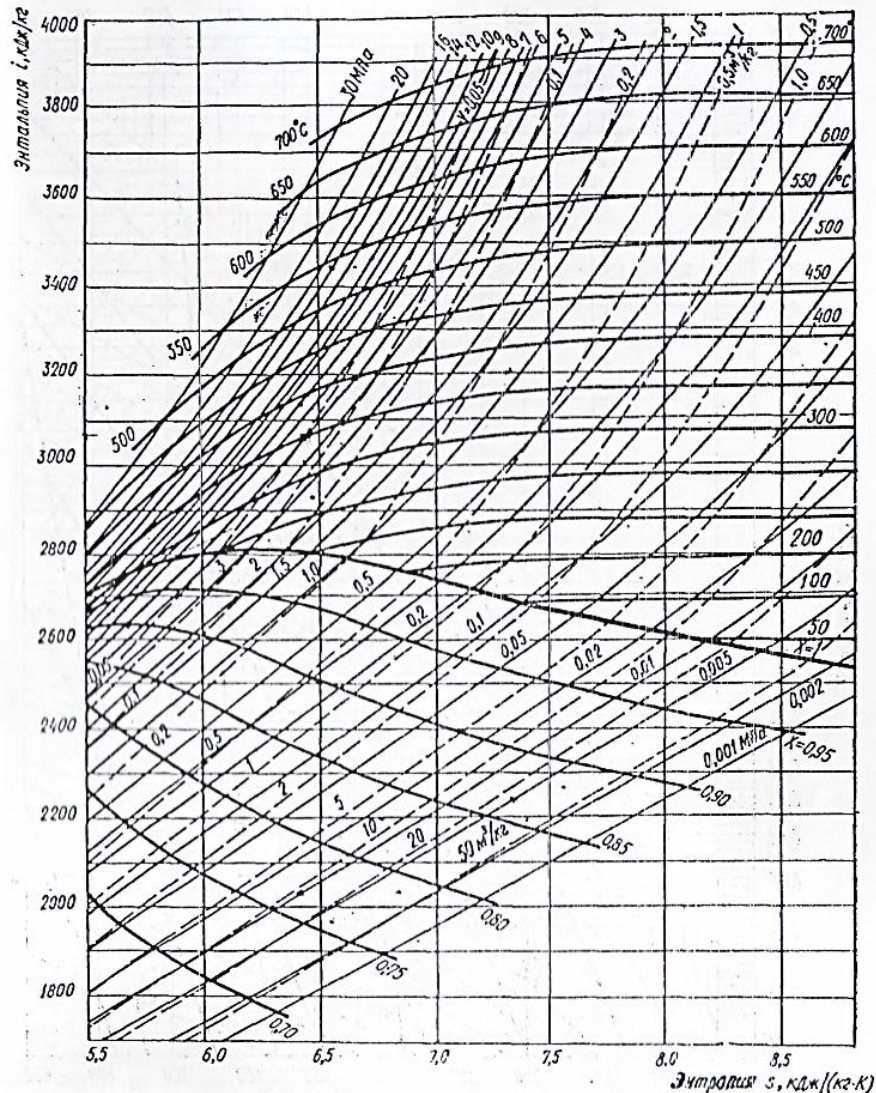


Рис.1. Усеченная $h-s$ -диаграмма для водяного пара.

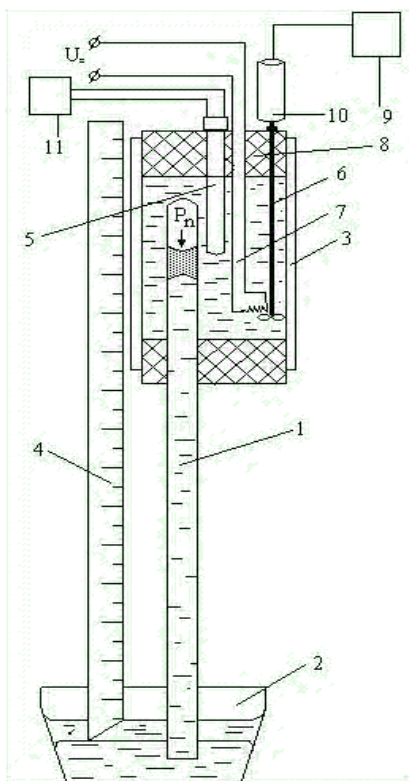
3. Описание лабораторного оборудования.

Схема лабораторной установки представлена на рис.2.

Установка состоит из стеклянной, запаянной сверху трубки 1 с внутренним диаметром $d_{тр}=2.5\text{ мм}$, заполненной ртутью. В трубку вводится небольшое количество воды, часть которой испаряется, и верхняя часть трубки заполняется насыщенным водяным паром. Нижний открытый конец трубки погружен в чашу со ртутью 2 со свободной поверхностью, залитой во избежание испарения ртути, маслом.

Верхняя часть трубки помещается в водяной термостат 3, вода в ко-

тором может быть нагрета до требуемой температуры тэном 7. Для выравнивания температуры в объеме термостата в него помещена мешалка 6, приводимая в движение электродвигателем постоянного тока 10.



Измерение температуры в термостате производится термопреобразователем сопротивления 5, подключенным по схеме трехпроводной цепи к логометру Ш69000, отградуированному в градусах Цельсия. Питание измерительного моста логометра производится от отдельного источника постоянного тока Б5-46, напряжение питания измерительного моста $\sim 3\text{В}$.

Измерение высоты столба ртути производится с помощью линейки 4. Нулевая отметка линейки совмещена с вершиной стеклянной трубки.

Рис.2. Схема лабораторной установки

4. Порядок выполнения работы.

Перед выполнением работы следует проверить, что нулевое положение измерительной линейки совпадает с верхом трубки, а уровень воды в термостате выше верхнего конца трубки.

Измерить и записать величину барометрического давления B в помещении, используя барометр-анероид в лаборатории.

4.1. Проведение эксперимента.

- включить питание стенда. При этом загорается сигнальная лампа “сеть”
- включить источник питания Б5-46. При этом измерительный прибор показывает температуру воды в термостате.
- включить тумблер “мешалка”.
- занести в таблицу первоначальную температуру и отметку положения ртутного столба по линейке.

Внимание: отметку положения столба ртути отсчитывать по верхней точке столба ртути, причем нулевая отметка соответствует вершине стеклянной трубки.

- тумблером “нагрев” включить электропитание тэна (загорается сигнальная лампа).

- по мере повышения температуры заносить в таблицу отметки положения столба ртути. Шаг по температуре можно принять 5°.

Таблица

Результаты проведения измерений

Барометрическое давление $B =$ мм.рт.ст.					
№ п/п	Температура $t, ^\circ C$	Отметка вершины столба ртути $h, мм$	Высота столба ртути $H, мм$	Давление насыщенных паров $p_n, бар$	погрешность $= \frac{\delta p_n}{p_{n таб}}$

4.2. Обработка результатов измерений.

Согласно уравнению Бернулли

$$B = p_n + p_{H_2O} + p_{Hg} + \Delta p_{п.н.}, \quad (2)$$

где p_n – давление насыщенных паров,

p_{H_2O} – давление водяного столбика на поверхности ртути. При максимальной высоте водяного столба 3мм это давление составляет 30Па и является несущественным, поэтому в дальнейших расчетах им пренебрегаем

p_{Hg} – давление ртутного столба в трубке. В исходном состоянии трубка установлена таким образом, что полная высота капилляра трубки при атмосферном давлении $H_0 + h_0 = 753 мм$. При повышении давления паров в капилляре часть ртути из капилляра переливается в чашу (см. Приложение 2) и уровень ртути в чаше повышается. Изменение отметки h на величину Δh ведет к повышению уровня ртути в чаше на величину

$\Delta h \frac{d^2}{D^2} = 0.0027 \Delta h$. При $\Delta h = 200$ мм уровень ртути в чаше повысится на 0.5 мм, что лежит в пределах погрешности измерения. Поэтому давление ртутного столба можно приближенно принять как $H = 753 - h$, мм.рт.ст., где h - текущее значение отметки вершины столба ртути.

$\Delta p_{\text{п.н.}}$ – избыточное давление в капилляре, обусловленное поверхностным натяжением. Оценка этого давления в нашем случае дает значение $\Delta p_{\text{п.н.}} \approx 0.35 \text{ кПа} = 0.0035 \text{ бар}$.

Таким образом, учитывая вышеизложенное, давление насыщенных водяных паров можно рассчитать по формуле

$$p_{\text{н}} = \frac{B-H}{750} - 0.0035, \text{ бар.} \quad (3)$$

Здесь барометрическое давление и высота столба ртути подставляются в мм.

По полученным значениям следует построить экспериментальную зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры. В этой же системе координат построить теоретическую кривую. В каждой точке вычислить относительную погрешность измерения и найти среднее значение погрешности.

5. Содержание отчета.

- Название и цель работы.
- Теплотехническая схема установки.
- Таблицы измеренных и вычисленных данных.
- Графики зависимости давления насыщенного пара от температуры.
- Выводы.

6. Задачи для самостоятельного решения.

Задача 1. Определить состояние водяного пара (сухой или влажный) при давлении 0.5 МПа и температуре 172°C.

Задача 2. Определить состояние водяного пара (сухой или влажный) при температуре 150°C и удельному объему 0.3 м³/кг.

Задача 3. В паровом котле находится 7 м³ воды и 5 м³ сухого пара при давлении 0.5 МПа. За какое время давление в котле при закрытых вентилях поднимется до 1.5 МПа, если от продуктов сгорания топлива к котлу ежеминутно подводится 20000 кДж тепла?

Контрольные вопросы.

1. В чем разница между сухим, влажным и перегретым паром?
2. Как определяется степень сухости пара?
3. Дайте определение степени перегрева водяного пара.
4. Можно ли понятия насыщенного и перегретого пара, степень сухости применить к другим веществам, кроме воды?
5. Дайте понятие критической температуры.

Зависимость абсолютного давления насыщенного
водяного пара от температуры

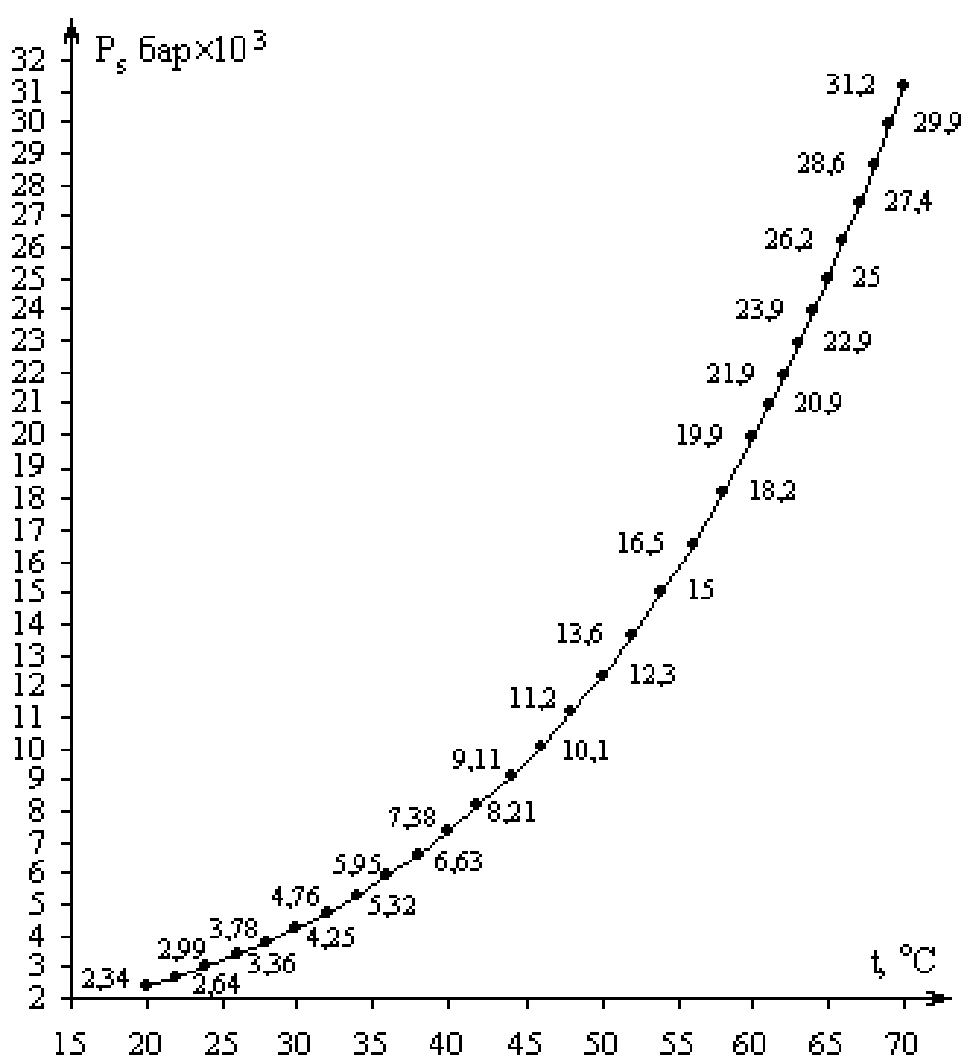
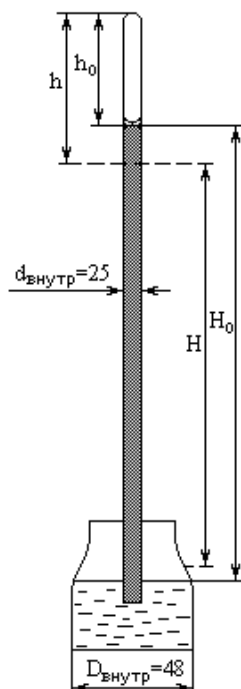


Схема отсчета уровней ртутного столба в лабораторной работе 3.



$$H = H_0 - 2,713 \times 10^{-3} (h - h_0)$$

(при $h_0 = 30$ мм)

H_0 – начальное положение ртутного столба при комнатной температуре, мм.

H – текущее положение ртутного столба при нагреве, мм.

h_0 – высота газового столба в начальный момент, мм.

h – высота газового столба в текущий момент, мм.

Учитывая малость величины $2,713 \times 10^{-3} (h - h_0)$, по сравнению с H_0 в измеряемом диапазоне температур, можно приближенно считать $H \approx H_0$ и $h_0 + H_0 \cong 753$ мм. рт. ст.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Определение теплоты парообразования воды .

1.Цель работы.

Знакомство с калориметрическими методами измерений и определение удельной теплоты парообразования воды.

2,Краткие теоретические сведения.

Состояние сухого насыщенного пара, образующегося в результате подогрева воды до температуры насыщения t_n , а затем полного ее испарения, определяется одним параметром – p или t_n . Все остальные параметры сухого пара определяются по таблицам насыщенных паров в зависимости от давления или температуры.

Количество тепла, необходимого для перевода 1 кг кипящей воды в сухой насыщенный пар при постоянном давлении и температуре, называется теплотой парообразования r . Для процесса парообразования первый закон термодинамики имеет следующий вид:

$$r = u'' - u' + p(v'' - v') \quad (1)$$

Теплота парообразования расходуется на изменение внутренней энергии $u'' - u' = \rho$, то есть на так называемую работу десегрегации по преодолению сил сцепления между молекулами жидкости, и работу расширения $p(v'' - v') = \psi$. Первое слагаемое называют внутренней теплотой парообразования, второе – внешней теплотой парообразования.

Для идеальных газов работа десегрегации равна нулю. Для водяного пара большая часть теплоты парообразования расходуется именно на переход жидкости в пар, а меньшая часть на работу расширения. Так, для водяных паров при $p=1 \text{ бар}$ отношение $\rho/\psi=12.4$.

Уравнение (1) можно переписать в виде

$$r = u'' + pv'' - (u' + pv') = h'' - h'$$

и рассчитывать скрытую теплоту парообразования через энтальпию воды и пара при заданной температуре или давлении.

Параметры сухого насыщенного пара и все его физические величины представлены в таблицах в зависимости от давления и температуры [1, 2].

Экспериментально удельная теплота парообразования (конденсации) может быть определена различными методами. В настоящей работе применяется конденсационный метод, представляющий собой чисто калориметрическое исследование.

Калориметрическая система представляет собой бак с водой 15 (см. рис.1), имеющий двойные стенки типа термоса, уменьшающие теплообмен системы с окружающей средой. В бак помещается устройство, воспринимающее или отдающее тепло. В результате чего температура системы изменяется. По изменению температуры системы определяют количество поглощенного или отданного тепла.

Основные характеристики калориметрической системы:

– **тепловая емкость калориметра**

$W = \sum M_i \cdot c_i$ численно равная количеству тепла, необходимого для изменения температуры калориметрической системы на один градус. Здесь M_i – масса и c_i – удельная теплоемкость предметов, составляющих систему,

– **темп охлаждения калориметрической системы**

$m = \frac{1}{\Delta t} \frac{\Delta t_{\text{в}}}{\Delta \tau}$. Здесь $\Delta t = t_{\text{в}} - t_{\text{о.с.}}$ – тепловой напор, $t_{\text{в}}$ и $t_{\text{о.с.}}$ – температура воды в системе и окружающей среды соответственно, $\Delta \tau$ – время, в течение которого происходит изменение температуры воды на величину $\Delta t_{\text{в}}$. Проведенные измерения показали, что калориметрическая система установки достаточно инерционна, и значение темпа ее охлаждения составляет $m=0.015 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$.

3. Описание лабораторной установки.

Лабораторная установка (рис.1) состоит из парогенератора 1 и калориметрической системы 16.

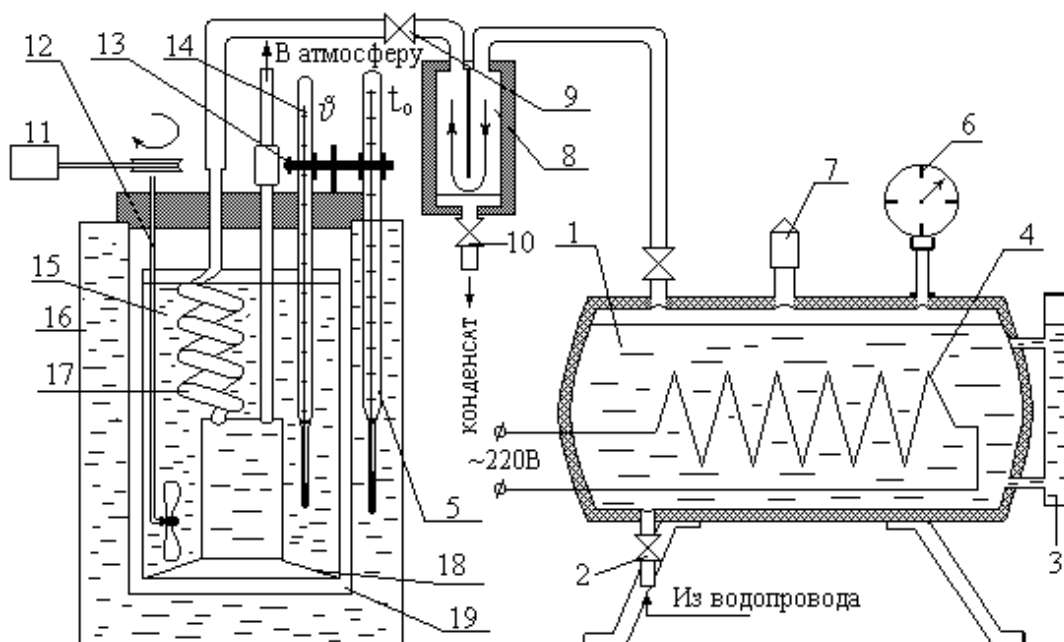


Рис.1. Схема установки

В парогенератор вода через вентиль 2 поступает из водопровода. Нагрев воды в парогенераторе производится прохождением тока между электродами, подключенными к трехфазной системе напряжения. Давление пара в парогенераторе контролируется манометром 6, предохранительный клапан 7 служит для экстренного выпуска пара в случае превышения давления сверх заданного. Из парогенератора пар по паропроводу подается к лабораторным стендам. При прохождении по паропроводу в первое время, пока паропровод не прогреется, пар частично конденсируется, для отделения конденсата в конце паропровода установлен влагоотделитель 8.

В настоящей работе в бак калориметрической системы помещается змеевик 17 со сборником конденсата. Насыщенный сухой пар подается в змеевик, где происходит охлаждение и частичная конденсация пара. Получающаяся за время измерения жидкость накапливается в бачке сборника конденсата. Тепло, выделяющееся при конденсации, накапливается в системе, в результате чего температура ее повышается. Для выравнивания температуры воды в объеме бака система оборудована мешалкой 12, приводимой во вращение электродвигателем 11. Температура воды в системе и оболочке измеряется термомпарами, подключенными к устройствам отображения информации.

Калориметрическая система лабораторной установки включает змеевик, сборник конденсата, воду калориметра, мешалку. Масса и теплоемкость составляющих элементов представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Теплофизические свойства элементов калориметра.

Элемент	Материал	Масса, кг	Теплоемкость, кДж/кг·К
змеевик	медь	0.295	0.388
сборник конденсата	сталь	0.435	0.46
вода		33.0	4.183
мешалка		пренебрегаем	

4. Порядок выполнения работы.

Перед выполнением работы следует по барометру определить барометрическое давление B в лаборатории.

4.1. Подготовка стенда к работе.

Поместите сборник конденсата со змеевиком в калориметр, предварительно убедившись, что в нем отсутствует вода.

Включите питание стенда и мешалку.

Включите парогенератор и дайте прогреться паропроводу. В первое время из трубки паропровода будет выходить влажный пар, после прогрева паропровода пар становится прозрачным.

4.2. Проведение эксперимента.

При появлении на выходе сухого насыщенного пара шланг соединяют со сборником конденсата, предварительно закрыв вентиль 9. Фиксируют температура воды и температуру стенок бака в начальный момент времени $t=0$, открывают вентиль, в систему начинает поступать пар. Измерение температуры воды и стенок бака следует проводить через каждые 30с. Результаты измерений занести в табл.2.

Таблица 2.

Изменение температуры в системе

$\tau, \text{с}$														
$\theta, \text{°C}$														
$t_0, \text{°C}$														

При этом следует внимательно следить за выходной трубкой сборника конденсата, и как только в стеклянной трубке начнет появляться конденсат, следует немедленно перекрыть вентиль 9 или отсоединить подводящий шланг от змеевика. Важно, чтобы конденсат не переполнил змеевик. При отключении подачи пара конденсат в змеевике и сборнике имеет температуру насыщения, которая выше температуры калориметра, поэтому температура системы будет повышаться некоторое время и после прекращения подачи пара. Измерение температуры следует продолжать до тех пор, пока температура воды не достигнет максимума θ_{max} и не начнет снижаться.

После прекращения калориметрических измерений следует извлечь змеевик из калориметра и обтереть сухой тряпкой. Далее сливают воду из сборника в мензурку, измеряют объем (массу) сконденсировавшейся воды M_k .

4.3. Обработка результатов измерений.

На рис.2 представлен типичный график изменения температуры калориметрической системы во времени с момента подачи пара. Такой ход температурной кривой объясняется тепловой инерцией системы и наличием небольших потерь в окружающую среду за счет излучения и конвекции.

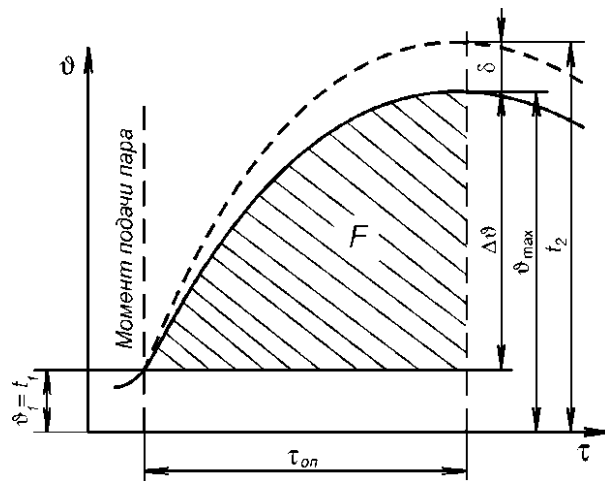


Рис.2. Изменение температуры калориметрической системы во времени.

Если бы тепловые потери отсутствовали, то кривая шла бы выше (пунктирная кривая) и повышение температуры на величину δ можно определить по формуле

$$\delta = m[(t_1 - \bar{t}_0)\tau_{оп} + J] \quad (2)$$

где m – темп охлаждения калориметрической системы,

t_1 – температура воды в баке калориметра в момент подачи пара,

\bar{t}_0 – средняя температура оболочки системы,

$\tau_{оп}$ – время опыта с момента подачи пара до момента достижения максимальной температуры θ_{max} воды в баке,

величина J равна заштрихованной площади на рис.2 и находится графическим интегрированием

$$J = \int [\theta(\tau) - t_1] d\tau \quad (3)$$

Таким образом, изменение температуры в бачке без потерь

$$\Delta t = \Delta\theta + \delta = (\theta_{max} - \theta_1) + \delta \quad (4)$$

$\theta_1 = t_1$ – начальная температура воды в баке.

Однако, при небольших и малоинтенсивных выделениях тепла, когда разность температур между калориметрической жидкостью и оболочкой мала, величина поправки незначительна и вклад ее в вычисление теплоты парообразования дает погрешность не более 3 ÷ 4%. Поэтому, если выполняется условие $\theta_{max} - \theta_1 \leq 8^\circ$, поправкой δ можно пренебречь. В настоящей работе это условие выполняется.

В противном случае следует определить поправку δ следующим образом:

построить график изменения температуры калориметрической системы (рис.2),

графически рассчитать площадь J под кривой за время, в течение которого температура системы достигла максимума, рассчитать поправку δ по формуле (3), определить изменение температуры в баке калориметра без потерь – формула (4)

Далее следует рассчитать теплоту парообразования из соотношения

$$W\Delta t = M_K \cdot r + M_K(h' - h_K) \quad (5)$$

уравнения теплового баланса в калориметре. Процесс в змеевике калориметра представлен на рис.3 в T, s – координатах.

Тепло, отданное паром при конденсации $M_K \cdot r$ и конденсатом при охлаждении от температуры насыщения до конечной температуры $M_K(h' - h_K)$, идет на нагревание калориметрической системы. Отсюда

$$r = \frac{W\Delta t}{M_K} - (h' - h_K) \quad (6)$$

Здесь h' – энтальпия конденсата в точке насыщения при атмосферном давлении B , h_K – энтальпия конденсата при конечной температуре. Значения энтальпии берутся по таблицам насыщенного водяного пара по давлениям и по температурам соответственно.

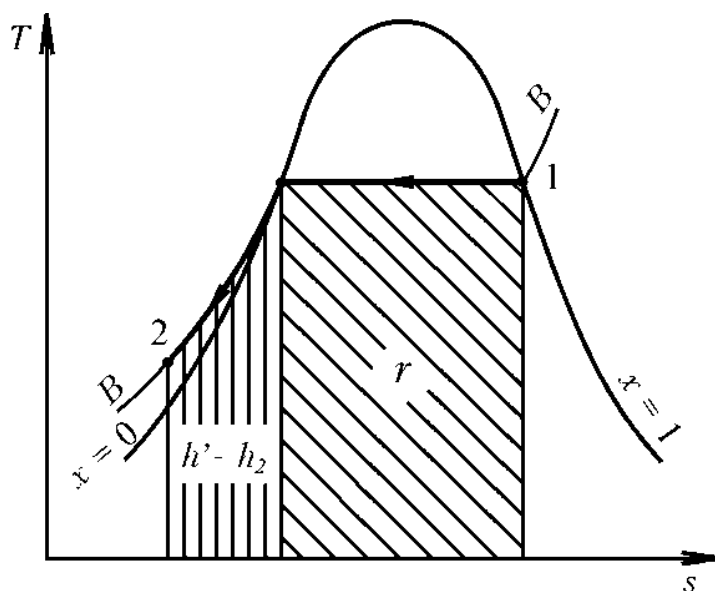


Рис.3. Процесс в змеевике калориметра.

Полученное значение удельной теплоты парообразования r следует сравнить с табличным значением, подсчитать абсолютную и относительную ошибку опыта. Результаты расчета занести в табл.3.

Таблица 3.

Расчет теплоты парообразования воды

		опыт1	опыт 2
барометрическое давление	$B, \text{кПа}$		
тепловое значение калориметра	$W, \text{кДж/К}$		
начальная температура воды в баке	$\theta_1 = t_1, \text{°C}$		
максимальная температура	$\theta_{max}, \text{°C}$		
средняя температура оболочки	$\bar{t}_0, \text{°C}$		
площадь под кривой нагрева	$J, \text{К}\cdot\text{с}$		
поправка	$\delta, \text{К}$		
изменение температуры в бачке	$\Delta t, \text{К}$		
масса конденсата	$M_k, \text{кг}$		
энтальпия конденсата в точке насыщения	$h', \text{кДж/кг}$		
энтальпия конденсата при конечной температуре	$h'_k,$		
теплота парообразования измеренная	$r, \text{кДж/кг}$		
табличное значение	$r_{табл}, \text{кДж/кг}$		
относительная погрешность	$\delta r, \%$		

После проведения измерений восстановить калориметрическую систему и повторить опыт. В новом опыте начальная температура воды в калориметре будет несколько выше, чем в предыдущем.

5. Содержание отчета.

- название и цель работы.
- теплотехническая схема установки.
- таблица с измеренными данными.
- график изменения температуры калориметра.
- таблица с вычисленными значениями.
- выводы.

6. Задачи для самостоятельного решения.

Задача 1. В калориметрическом исследовании по методике лабораторной работы в змеевик подается влажный пар. Оцените степень сухости пара, если расчеты по приведенной выше методике дают значение $r=1700$ кДж/кг.

Задача 2. Перегретый водяной пар имеет температуру 350°C и давление 2 бара. До какой температуры следует его охладить в изобарном процессе, чтобы в нем образовалась жидкая фаза?

Задача 3. В замкнутом объеме находится водяной пар при давлении 1,6 бара и температуре 300°C. Через стенки сосуда отводится тепло. Определите, какие температура и давление будут в сосуде, когда в паре начнет образовываться жидкая фаза.

Задача 4. Найти давление и удельную теплоту парообразования воды, если она находится в состоянии кипения, а температура ее составляет 250°C.

Задача 5. В паровом котле находятся вода и водяной пар при давлении 11 МПа. Какое количество теплоты в секунду нужно подводить к котлу, чтобы производство пара составляло 20 кг/с. Коэффициент полезного действия паровой установки 0,89.

Контрольные вопросы.

1. В таблице для насыщенного водяного пара по давлениям величина скрытой теплоты парообразования при давлении 221,29 бар равна нулю. Что это означает?

2. Почему с ростом температуры значение удельной теплоты парообразования уменьшается?

3. Какой водяной пар называется сухим?

4. Почему изолинии температуры и давления для влажного пара совпадают?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.

Исследование процесса адиабатного истечения воздуха через суживающееся сопло.

1. Цель работы.

Практическое усвоение раздела курса технической термодинамики, связанного с процессами течения газов в профилированных каналах.

Знакомство с техникой лабораторного эксперимента в области теплотехники. Проведение теплотехнических расчетов.

2. Краткие теоретические сведения

Постановка задачи: имеется сосуд неограниченной емкости, в котором находится рабочее тело – газ или пар с параметрами состояния p_1, v_1, T_1 (рис.1). Рабочее тело вытекает в среду с давлением $p_{cp} < p_1$ за счет перепада давления через сопло, имеющее форму суживающего усеченного конуса (рис.2). Выходное сечение сопла называется устьем. Обозначим параметры газа на выходе из сопла через p_2, v_2, T_2 , площадь сечения устья сопла f , скорость, вытекающего из устья сопла газа $w_2 = w$. Если сосуд А достаточно большой, то скоростью втекающего в сосуд газа w_1 можно пренебречь.

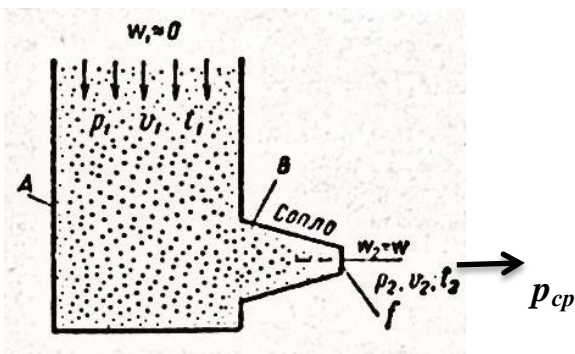


Рис.1. Схема истечения газа из сосуда неограниченной емкости

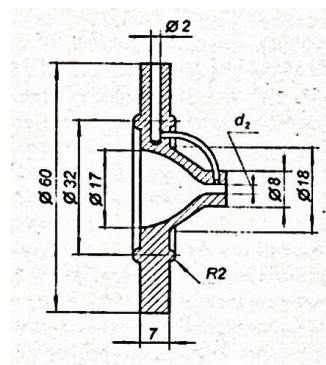


Рис.2. Чертеж суживающегося сопла, примененного в работе

Воздух можно считать идеальным газом, а истечение газа через сопло в большинстве случаев можно считать адиабатным.

Используя уравнения для идеального газа при адиабатном процессе, скорость истечения газа через сопло определить по формуле

$$w = 44.72 \sqrt{h_1 - h_2}, \quad (1)$$

здесь энтальпия подставляется в кДж/кг , а массовый расход

$$G = \frac{fw}{v_2} = f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{v_1} \left[\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (2)$$

здесь k – показатель адиабаты, для воздуха можно принять $k=1.4$,

$$\beta = \frac{p_{cp}}{p_1} - \text{отношение давлений.}$$

Очевидно, что при $\beta=1$ ($p_1=p_{cp}$) истечения не будет и $G=0$, $w=0$. При уменьшении давления p_2 и β при постоянном давлении на входе p_1 скорость и расход газа будут увеличиваться и логически предположить, что расход и скорость истечения будут стремиться к максимуму при $p_1 \rightarrow 0$. Но согласно формуле (2) расход достигает максимума при некотором критическом значении отношения для воздуха равном $\beta_{кр} \approx 0,5$, а затем уменьшается до нуля при $\beta=0$ (тонкая линия), что представляется неправдоподобным и не соответствует опытным данным (см.рис.3). В реальном процессе при $\beta < \beta_{кр}$ расход остается постоянным – прямая линия DB.

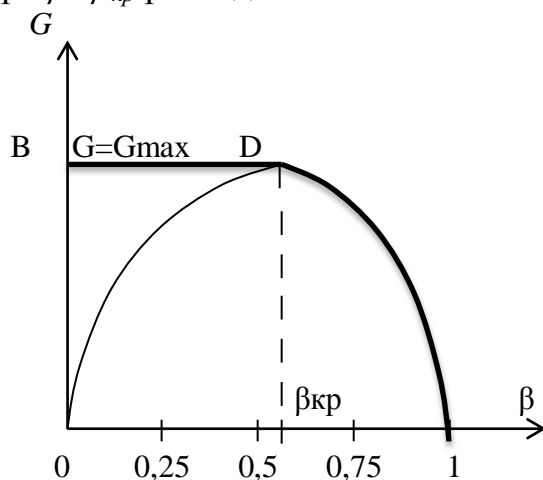


Рис.3. График зависимости массового расхода от β . Тонкая линия соответствует уравнению (2) при $\beta < \beta_{кр}$, а прямая BD фактическому процессу истечения газа через сопло.

Объяснение этому расхождению с формулой (2) и логикой следующее: при возрастании разности давлений увеличиваются расход и скорость истечения газа через сопло и при отношении порядка $\beta_{кр} \approx 0,5$ скорость истечения газа достигает критического значения $w_{кр} = \sqrt{kp_{2кр}v_{2кр}} = w_{зв}$, равного местной скорости звука в устье сопла. Для суживающегося сопла получить скорость истечения больше критической нельзя (в расширяющихся насадках – диффузорах такое возможно).

Таким образом, при $\beta > \beta_{кр}$ давление в устье сопла $p_2=p_{cp}$ равно давлению среды, куда газ поступает, а при $\beta < \beta_{кр}$ давление в устье остается постоянным $p_2=p_{2кр}$, а скорость истечения ограничивается местной скоростью звука.

3. Описание лабораторного оборудования.

Экспериментальная установка (рис.4) состоит из воздухопровода, в котором расположено суживающее сопло 2, баллона 3, в котором вакуумным насосом 4 создается пониженное давление. Для измерения давления непосредственно перед соплом используется механический вакуумметр 5, а для измерения давления в устье сопла и баллоне применяются датчики давления МТ-100РР, индикация которых выведена на миллиамперметры 6

и 7. Измерение расхода воздуха производится ротаметром 1. При откачке воздуха из системы воздухопровод закрывается пробкой 8.

Пересчет показаний приборов в значения абсолютного давления:

Образцовый вакуумметр измеряет разницу между давлением в измеряемой среде и атмосферным. 100 единиц шкалы прибора соответствуют понижению давления по сравнению с атмосферным на величину $1\text{кГ/см}^2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Па}$, или $1\text{ед.} = -980 \text{ Па}$. Поэтому, если показание вакуумметра равно N ед., то фактическое давление непосредственно перед соплом $p_1 = B - 980N$ (Па), где B - атмосферное давление, измеряемое барометром в лаборатории.

Миллиамперметры датчиков давления включены таким образом, что нулевое показание прибора соответствует атмосферному давлению B , а максимум шкалы (5 единиц) – давлению 0. Следовательно, при показаниях прибора n ед. абсолютное давление, измеряемое прибором $p = B \left(1 - \frac{n}{5}\right)$.

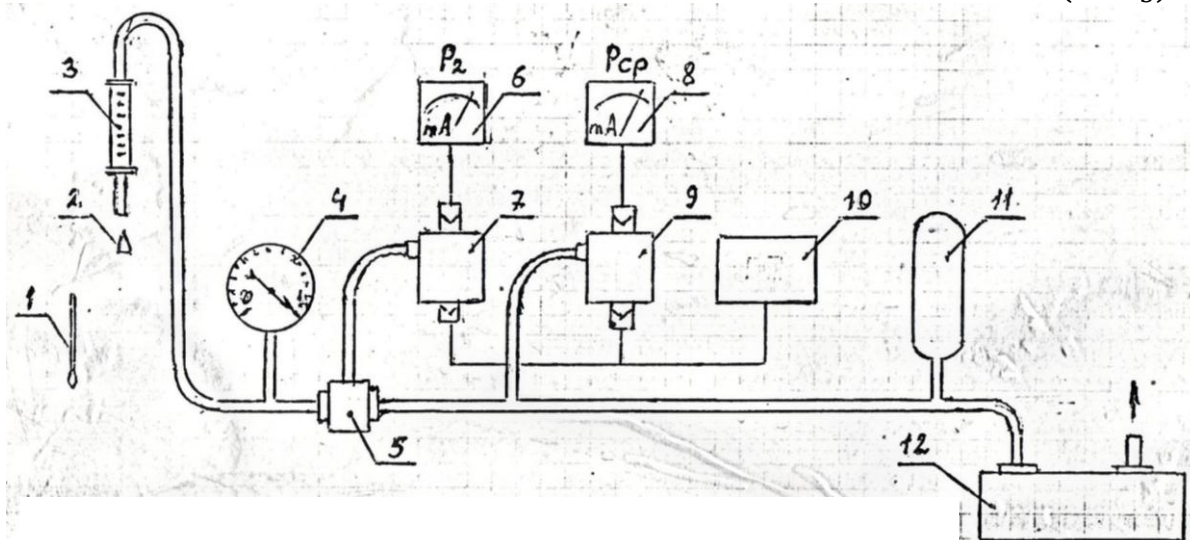


Рис.4. Схема экспериментальной установки. 1 – термометр, 2 – пробка, 3 – ротаметр газовый 0.63ГУЗ, 4 – вакуумметр образцовый механический, 5 – суживающееся сопло, 6 , 8 – миллиамперметры систем измерения давления в устье сопла и баллона соответственно, 7, 9 – датчик вакуумметрического давления МТ-100Р, 10 – блок питания 4БП36, 11 – ресивер, 12 – насос вакуумный ВН-451м

4. Порядок выполнения работы.

До начала выполнения опытов следует по показаниям термометра и барометра измерить температуру t_1 и давление B воздуха в лаборатории.

4.1. Подготовка стенда к работе.

- включить стенд, при этом загорится индикаторная лампа,
- убедиться, в нулевых показаниях миллиамперметров и вакуумметра.

4.2. Проведение эксперимента.

- закрыть пробкой 8 входное отверстие воздухопровода;
- включить вакуумный насос и откачать воздух из системы по показаниям миллиамперметра 7, измеряющего давление в баллоне, до значения 3.4 или несколько выше, после чего отключить насос;
- удалить пробку 8 из отверстия. При этом воздух будет поступать в баллон, давление в узлах системы будет изменяться. Произвести запись изменения показаний приборов, данные занести в табл.1;

Внимание: при проведении измерений необходимо одновременно фиксировать показания приборов, для чего требуется 4 студента, наблюдающих каждый за своим прибором.

- Для повышения точности вычислений и исключения случайных ошибок произвести 3 подобных эксперимента и рассчитать средние значения измеряемых величин, по которым и производить дальнейшие расчеты.

Таблица1

Показания приборов при проведении опытов.

опыт	1	2	3	1	2	3	1	2	3	средние значения		
	p ₁ , ед.			p ₂ , ед			V, от.ед.			p ₁ ,ед	p _v ,ед	V,ед
3.2												
3.0												
2.8												
2.6												
2.4												
2.2												
2.0												
1.8												
1.6												
1.4												
1.2												
1.0												
0.8												
0.6												
0.4												
0.2												

4.3. Обработка результатов измерений.

По средним значениям измеренных величин, используя вышеприведенные формулы рассчитать абсолютное давление в баллоне p_{cp} , на входе в сопло p_1 , в устье сопла p_2 .

Используя тарировочную кривую ротаметра (Приложение А) определить объемный расход воздуха V_g и рассчитать действительный массовый расход

$$G_d = \frac{BV_g}{RT_1}, \quad (3)$$

где B – атмосферное давление,

$R = 287 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ – газовая постоянная для воздуха,

T_1 – температура воздуха на входе в сопло, принять равной температуре окружающей среды.

Рассчитать отношение давлений β и массовый расход G_d .

Результаты расчетов занести в табл.2.

Таблица 2

Изменение давления в характерных участках установки

Барометрическое давление $B = \quad \text{Па}$						
Температура воздуха на входе $t_1 = \quad \text{°C}$, $T_1 = \quad \text{K}$						
Диаметр выходного отверстия сопла $d_2 = 1.5 \text{ мм}$						
номер п/п	$p_1, \text{ Па}$	$p_2, \text{ Па}$	$p_{cp}, \text{ Па}$	$\beta = p_{cp}/p_1$	$V_g, \text{ м}^3/\text{с}$	$G_d, \text{ кг/с}$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						

По характеру изменения давления в устье сопла и массовому расходу определить значение критического отношения $\beta_{кр}$.

4.4. Расчет коэффициентов расхода и скоростного коэффициента.

Для одного из режимов работы сопла при $\beta > \beta_{кр}$ (вариант а) и при $\beta < \beta_{кр}$ (вариант б) рассчитать коэффициент расхода $\mu = G_d / G$ и скоростной коэффициент сопла $\varphi = w_{2d} / w_2$,

Используя уравнения для идеального газа в адиабатном процессе, а также термодинамические функции воздуха (см. таблицу в Приложении), легко найти теоретический массовый расход

$$G = \frac{f_2 w_2}{v_2} \quad (4)$$

и скорость истечения

$$w_2 = 44.72 \sqrt{h_1 - h_2} \quad (5)$$

Здесь

f_2 – площадь выходного сечения сопла, m^2 ;

w_2 – теоретическая скорость воздуха на выходе из сопла, м/с;

v_2 – удельный объем воздуха на выходе из сопла, m^3/kg ,

h_1 – энтальпия воздуха на входе в сопло, kJ/kg ;

h_2 – энтальпия воздуха на выходе из сопла kJ/kg .

Удельный объем воздуха на выходе из сопла определяется по уравнению состояния идеального газа

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2}, \quad (6)$$

а температуру T_2 воздуха в устье сопла следует подобрать согласно нижеприведенной методике.

Выше приведенные формулы не учитывают трение воздуха в процессе истечения, учет трения нам даст действительные значения скорости и массового расхода, меньше теоретических. Поскольку при истечении с трением и без трения расширение воздуха в потоке происходит до одного и того же давления p_2 на выходе из сопла, то точка **2д**, соответствующая действительному процессу истечения с трением, будет лежать на той же изобаре, но правее точки **2**. Действительный процесс истечения на $h-s$ – диаграмме изображен пунктирной линией (рис.5).

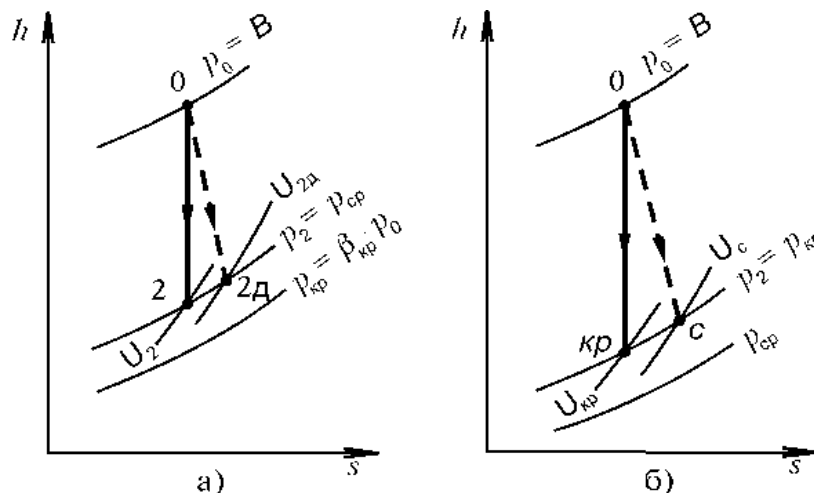


Рис.5. Процесс адиабатного истечения в $h-s$ – диаграмме

а) при $\beta > \beta_{кр}$, б) при $\beta < \beta_{кр}$

Так как положение точки $2д$ на изобаре p_2 неизвестно, то расчет действительной скорости $w_{2д}$ следует производить методом последовательного приближения, используя уравнения

$$w_2 = 44.72 \sqrt{h_1 - h_{2д}} \quad (7)$$

$$w_{2д} = \frac{G_d v_{2д}}{f_2} \quad (8)$$

В этих формулах

G_d – действительный массовый расход воздуха, измеряемый в эксперименте (табл.2),

$h_{2д}$ – энтальпия воздуха на выходе из сопла в действительном процессе,

$v_{2д}$ – удельный объем воздуха на выходе из сопла, который определяется по уравнению состояния идеального газа

$$v_{2д} = \frac{RT_{2д}}{p_2}. \quad (9)$$

Очевидно, что расчеты по формулам (7) и (8) должны привести к одинаковым результатам.

Таким образом, расчеты сводятся к определению действительной температуры воздуха на выходе из сопла.

Алгоритм расчета представлен ниже.

Вариант а ($\beta > \beta_{кр}$).

Зная параметры воздуха на входе в сопло p_1, t_1 и давление на выходе p_2 и используя соотношения для обратимого адиабатного процесса идеального газа и таблицы Приложения 1, определить значения температуры T_2 и энтальпии h_2 на выходе:

из таблицы выписываем при температуре t_1 значения энтальпии h_1 и относительного давления π_{01} ; относительное давление на выходе определяем по соотношению $\pi_{02} = \pi_{01} \frac{p_2}{p_1}$ и по этому значению выписываем значения температуры T_2 и энтальпии h_2 воздуха на выходе из сопла.

Действительная температура воздуха на выходе $T_{2д}$ не известна. В первом приближении принимаем $T_{2д}$ на 2 – 3°С выше температуры T_2 теоретического процесса истечения.

Выписываем из таблицы Приложения значение энтальпии воздуха $h_{2д}$ при принятой температуре $T_{2д}$.

Определяем удельный объем по формуле (6) и действительную скорость по формулам (7) и (8).

При несовпадениях скорости истечения, вычисленной по формулам (7) и (8) следует изменять принятое значение действительной температуры $T_{2д}$ до тех пор, пока значения скорости не совпадут.

Далее следует рассчитать коэффициент расхода $\mu = G_d/G$ и скоростной коэффициент сопла $\varphi = w_{2d}/w_{2кр}$,

Вариант б ($\beta < \beta_{кр}$)

В этом случае скорость истечения равна местной скорости звука, а давление на выходе из сопла – критическому $p_2 = p_{кр} = \beta_{кр} p_1$.

Для одного из режимов варианта б) произвести расчеты, аналогичные варианту а). Порядок и формулы для расчета аналогичны вышеприведенным, при этом индекс **2** следует заменить на индекс **кр**.

5. Содержание отчета.

- Название и цель работы.
- Схема установки.
- Таблицы измеренных данных.
- Графики зависимостей $G_d = f(\beta)$ и $p_2 = f(p_1)$.
- Необходимые расчеты для двух режимов работы сопла – одного докритического и одного из критических.
- Выводы.

Контрольные вопросы.

1. Уравнение первого закона термодинамики для потока.
2. Объясните зависимость массового расхода при истечении через суживающееся сопло от отношения β .
3. Особенности истечения газов через суживающееся сопло.
4. От чего зависят критическая скорость и критическое давление за соплом?
5. Почему действительная температура воздуха на выходе из сопла выше теоретической?
6. Влияние трения при адиабатном истечении.
7. Понятие числа Маха.
8. В каких случаях можно добиться сверхзвуковой скорости истечения газа?

Приложение 1.

Термодинамические свойства воздуха [9].

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$h, \text{кДж/кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	$\pi_0 = \frac{p}{p_0}$	$\theta_0 = \frac{v}{v_0}$	$s_0, \text{кДж/(кг} \times \text{K)}$
-29	244,15	244,16	174,09	0,6751	10378	6,4955
-28	245,15	245,16	174,80	0,6848	10273	6,4996
-27	246,15	246,16	175,52	0,6946	10169	6,5037
-26	247,15	247,16	176,23	0,7045	10067	6,5078
-25	248,15	248,17	176,95	0,7145	9966	6,5118
-24	249,15	249,17	177,66	0,7216	9866	6,5159
-23	250,15	250,17	178,38	0,7349	9768	6,5199
-22	251,15	251,17	179,09	0,7452	9672	6,5239
-21	252,15	252,17	179,81	0,7556	9576	6,5278
-20	253,15	253,18	180,52	0,7661	9482	6,5318
-19	254,15	254,18	181,24	0,7767	9390	6,5358
-18	255,15	255,18	181,95	0,7874	9298	6,5397
-17	256,15	256,18	182,67	0,7983	9208	6,5436
-16	257,15	257,19	183,39	0,8092	9119	6,5475
-15	258,15	258,19	184,10	0,8203	9031	6,5514
-14	259,15	259,19	184,82	0,8314	8945	6,5553
-13	260,15	260,19	185,53	0,8427	8859	6,5592
-12	261,15	261,20	186,25	0,8540	8775	6,5630
-11	262,15	262,20	186,96	0,8655	8692	6,5668
-10	263,15	263,20	187,68	0,8771	8609	6,5707
-9	264,15	264,20	188,39	0,8888	8528	6,5745
-8	265,15	265,21	189,11	0,9006	8448	6,5782
-7	266,15	266,21	189,82	0,9125	8369	6,5820
-6	267,15	267,21	190,54	0,9246	8292	6,5858
-5	268,15	268,21	191,26	0,9367	8215	6,5895
-4	269,15	269,22	191,97	0,9490	8139	6,5933
-3	270,15	270,22	192,69	0,9614	8064	6,5970
-2	271,15	271,22	193,40	0,9739	7990	6,6007
-1	272,15	272,22	194,12	0,9865	7917	6,6044
0	273,15	273,23	194,83	0,9992	7845	6,6080
1	274,15	274,23	195,55	1,0120	7774	6,6117
2	275,15	275,23	196,27	1,0250	7703	6,6154
3	276,15	276,24	196,98	1,0381	7634	6,6190
4	277,15	277,24	197,70	1,0513	7565	6,6226
5	278,15	278,24	198,41	1,0646	7498	6,6262
6	279,15	279,24	199,13	1,0780	7431	6,6298

7	280,15	280,25	199,85	1,0916	7365	6,6334
8	281,15	281,25	200,56	1,1052	7300	6,6370
$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$h,$ кДж/кг	$u, \text{кДж/кг}$	$\pi_0 = \frac{p}{p_0}$	$\theta_0 = \frac{v}{v_0}$	$s_0,$ $\text{кДж/(кг} \times \text{K)}$
9	282,15	282,25	201,28	1,1190	7235	6,6406
10	283,15	283,26	201,99	1,1330	7172	6,6441
11	284,15	284,26	202,71	1,1470	7109	6,6476
12	285,15	285,26	203,43	1,1612	7047	6,6512
13	286,15	286,27	204,14	1,1755	6986	6,6547
14	287,15	287,27	204,86	1,1899	6925	6,6582
15	288,15	288,27	205,57	1,2045	6865	6,6617
16	289,15	289,28	206,29	1,2191	6806	6,6651
17	290,15	290,28	207,01	1,2339	6748	6,6686
18	291,15	291,28	207,72	1,2489	6690	6,6721
19	292,15	292,29	208,44	1,2639	6633	6,6755
20	293,15	293,29	209,16	1,2791	6577	6,6789
21	294,15	294,29	209,87	1,2944	6521	6,6823
22	295,15	295,30	210,59	1,3099	6466	6,6858
23	296,15	296,30	211,31	1,3255	6411	6,6891
24	297,15	297,30	212,02	1,3412	6358	6,6925

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.

Исследование термодинамических процессов во влажном воздухе

1. Цель работы.

Изучение изменения состояния воздуха при прохождении через сушильную установку, экспериментальное определение количества испаренной влаги, расхода тепла на 1 кг испаренной влаги, определение потерь тепла в отдельных частях установки.

Получение навыков работы с h - d -диаграммой для влажного воздуха и приборами для измерения влажности, температуры, расхода.

2. Краткие теоретические сведения

Атмосферный воздух всегда содержит некоторое количество водяного пара. Общее (барометрическое) давление такого воздуха будет складываться из парциальных давлений сухого воздуха и водяного пара

$$B = p_{\text{в}} + p_{\text{п}}$$

Наивысшее значение $p_{\text{п}}$ при данной температуре влажного воздуха есть давление насыщенного пара $p_{\text{н}}$ и такой воздух, содержащий сухой пар, называют *насыщенным влажным воздухом*, в таком воздухе находится максимально возможное при данной температуре количество водяного пара. Часто содержание водяного пара в воздухе меньше максимального при данной температуре (водяной пар находится в перегретом состоянии) и он способен к дальнейшему увлажнению. Такой влажный воздух называется *ненасыщенным* и используется в качестве сушильного агента в различных сушильных установках.

К величинам, которые характеризуют содержание водяных паров в воздухе, относятся следующие:

абсолютная влажность – количество водяного пара в 1 м^3 влажного воздуха, т.е. фактически – плотность пара при его парциальном давлении $p_{\text{п}}$ и температуре t .

относительная влажность – отношение абсолютной влажности ненасыщенного воздуха к абсолютной влажности насыщенного воздуха при той же температуре

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}}$$

Поскольку при атмосферном давлении парциальные давления пара малы, такой водяной пар можно считать идеальным газом и отношение плотностей можно заменить на отношение парциальных давлений

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}},$$

ошибка в расчетах при этом составит не более 2%.

влажосодержание – отношение массы пара к массе сухого воздуха паровоздушной смеси

$$d = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{в}}} = \frac{g_{\text{п}}}{g_{\text{в}}},$$

где G – масса, а g – массовые доли пара и воздуха соответственно. Влажность принято измерять в граммах водяного пара на 1 кг сухого воздуха. Значение влагосодержания d при постоянном барометрическом давлении B полностью определяется парциальным давлением пара и не зависит от температуры воздуха

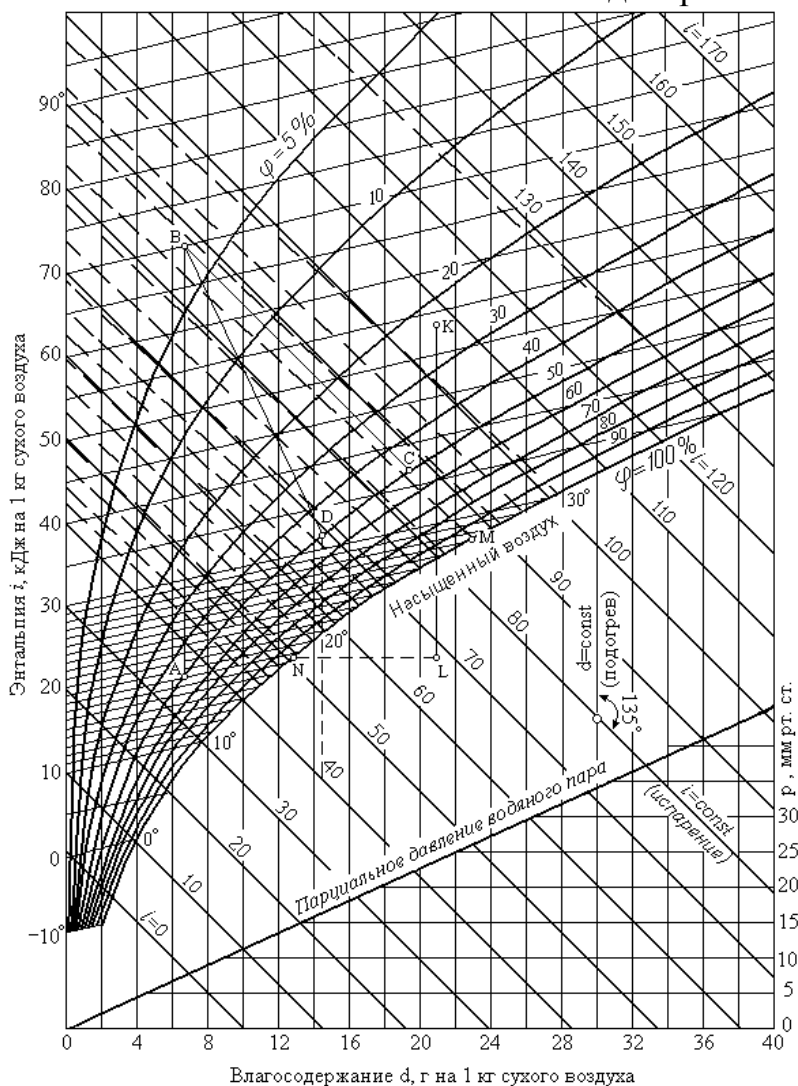
$$d = 622 \frac{\varphi p_{\text{н}}}{B - \varphi p_{\text{н}}}, \text{ г/кг}$$

Максимально возможное содержание влаги в воздухе $d_{\text{max}} = 622 \frac{p_{\text{н}}}{B - p_{\text{н}}}$ с температурой возрастает.

энтальпию влажного воздуха относят к 1 кг сухого воздуха в паровоздушной смеси и определяют как сумму энтальпий сухого воздуха и водяного пара

$$h = h_{\text{в}} + dh_{\text{п}}$$

Параметры влажного воздуха удобно определять с помощью **h-d-диаграммы** (рис. 1), которая строится для нормального барометрического давления 745 мм рт.ст. при отсчете энтальпии для воздуха от 0°C. Практически диаграммой можно пользоваться во всех случаях расчета сушильных аппаратов, так как при обычных колебаниях атмосферного давления значения h и d изменяются слабо. На диаграмме изображены изолинии энтальпии, относительной влажности, на оси абсцисс отложено влагосодержание. Также на детальной h-d-диаграмме нанесены линии $t_{\text{м}} = \text{const}$ температуры мокрого термометра, характеризующие процессы испарения влаги с учетом дополнительного количества тепла, вносимого водой с температурой выше 0°C.



Энтальпия, кДж на 1 кг сухого воздуха

Р, мм рт. ст.

Рис. 1. Изменение состояния влажного воздуха при нагреве и влагопоглощении

Процесс сушки состоит из нагрева атмосферного воздуха в калорифере, подаче воздуха в сушильную камеру, в которой происходит испарение воды и насыщение воздуха дополнительной влагой. В термодинамическом процессе испарения влаги энтальпия воздуха остается постоянной, так как энергия, отбираемая от воздуха для подсушивания влажного материала, возвращается к нему вместе с испаренной влагой, поэтому на диаграмме процесс, если не учитывать потери, пойдет по линии $h=const$. На $h-d$ -диаграмме этот процесс представлен линиями К-Л – процесс нагрева воздуха при постоянном влагосодержании и L-M – процесс влагопоглощения горячим воздухом, энтальпия воздуха при этом остается постоянной, что имеет место при адиабатном процессе. Строго говоря, процесс влагопоглощения идет с увеличением энтальпии воздуха, поскольку испаряемая вода имеет температуру выше 0°C . В реальных же условиях, когда имеются потери тепла в окружающую среду, энтальпия воздуха уменьшается и линия процесса испарения отклоняется от изоэнтальпийной.

3. Описание лабораторного оборудования.

Лабораторный стенд представляет собой модель сушильной установки, в которой сушильным агентом является воздух, а высушиваемым материалом - хлопчатобумажная ткань, смоченная водой (рис.2).

Воздух через входную трубу I засасывается в калорифер II, где нагревается и попадает в сушильную камеру III, в которой располагается смоченная водой ткань. Далее воздух через воздухопровод VI вентилятором V отводится наружу. Начальное состояние воздуха определяется с помощью психрометра IV.

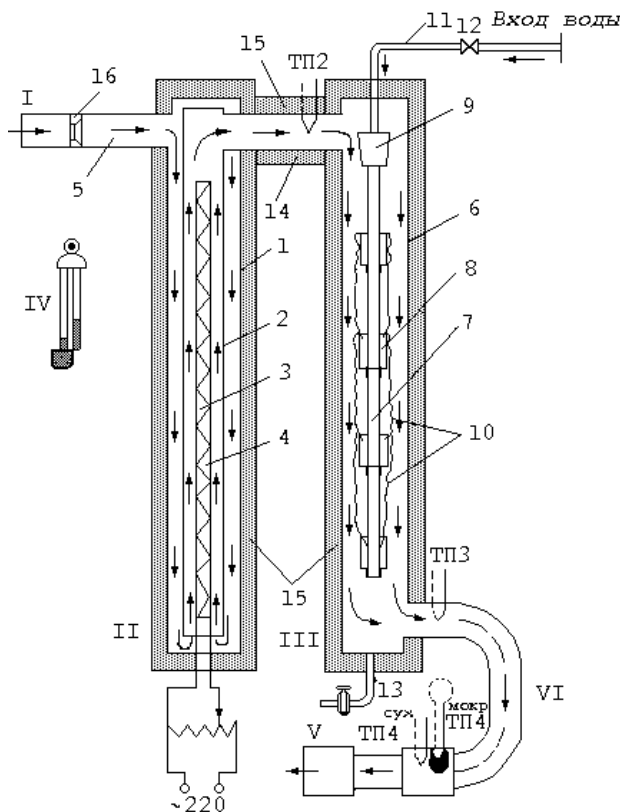


Рис.2. Схема установки. 1 - корпус калорифера, 2 – труба, 3 – нихромовая проволока, 4 - кварцевый стержень, 5 – входная труба, 6 – сушильная камера, 7 – шторм, 8 – стаканчики, 9 - разбрызгиватель, 10 – ленты хлопчатобумажной ткани, 11 – трубка для залива воды в сушильную камеру, 12 – кран, 13 – трубка для слива излишков воды с краном, 14 – патрубок, соединяющий калорифер с сушильной камерой, 15 – теплоизоляция установки, 16 – ротаметр.

Состояние воздуха на выходе определяется с помощью двух термопар ТП4 – “сухой” и “мокрой”, расположенных вне сушильной установки.

Нагрев воздуха в калорифере производится с помощью расположенного там тэна 3, мощность нагревателя регулируется автотрансформатором. Напряжение и ток нагревателя измеряются приборами, расположенными на стенде. Температура воздуха на выходе из калорифера измеряется термопарой ТП2.

Нагретый воздух попадает в сушильную камеру, где происходит его увлажнение. В сушильной камере расположены стаканчики 8, заполненные водой, на стенках которых закреплены ленты 10 из хлопчатобумажной ткани, концы которых заведены внутрь стаканчиков. Термопара ТП3 служит для измерения температуры воздуха на выходе из сушильной камеры.

Объемный расход воздуха определяется по ротаметру 16, установленному на входной трубе. Градуировочная кривая ротаметра приведена в Приложении А.

Измерение температуры воздуха производится с помощью хромель-копелевых термопар, показания которых снимаются прибором Ф266. Подключение термопар к прибору производится посредством переключателя Т2 ÷ Т4. Градуировочная таблица для перевода термо-эдс в градусы прилагается (Приложение В).

Внимание: термопара измеряет термо-эдс, возникающую между “горячим” и “холодным” спаями. Поскольку “холодный” спай имеет температуру окружающей среды, к значению температуры из градуировочной таблицы следует прибавить температуру окружающей среды
 $t_{\text{факт.}} = t_{\text{тэдс}} + t_{\text{о.с.}}$

Для выполнения работы прилагаются;
график для определения расхода по газу для ротаметра РМ-0.04Ж (Приложение А),
психрометрический график (Приложение Б),
таблица перевода термо-эдс хромель-копелевой термопары в температуру (Приложение В).

4. Порядок выполнения работы.

4.1. Подготовка стенда к работе.

Перед выполнением работы необходимо лабораторный стенд подготовить:

- открыть входное 12 и выходное 13 отверстия сушильной камеры,
- через входное отверстие сушильной камеры заливать воду, смачивающую ткань 10, пока из выходного отверстия не потечёт вода,
- закрыть входное и выходное отверстия,
- смочить наконечник “мокрой” термопары ТП4^{”мокр”}, предварительно вынув ее из гнезда в воздухопроводе.

Также необходимо произвести измерения параметров исходного состояния воздуха:

- барометрического давления B по показаниям барометра в помещении лаборатории,
- исходную влажность воздуха по психрометру. Для этого смочить ватку на “мокрое” термометре, измерить показания термометров, и по психрометрической таблице определить относительную влажность воздуха в исходном состоянии.
- по показаниям “сухого” термометра определить исходную температуру воздуха t_1 .

4.2. Проведение эксперимента.

- включить питание стенда и вентилятора. При этом загорается сигнальная лампа “сеть”
- включить тумблер питания нагревательного элемента – загорается сигнальная лампа “нагрузка”
- ручкой автотрансформатора выставить напряжение питания $20 \div 25$ В
- переключатель термодатчиков поставить в положение “Т2”, в котором измеряется температура воздуха на выходе из калорифера
- следить за показаниями прибора и дожидаться момента, когда в калорифере наступит тепловое равновесие, о чем будет свидетельствовать постоянство показаний прибора в течение 5 минут.
- произвести измерения температур в воздухопроводе.
- данные измерений занести в таблицу

Таблица

Протокол проведения измерений

Барометрическое давление $B =$ кПа												
Показания психрометра $t_1^{\text{сух}} =$ °С , $t_1^{\text{мокр}} =$ °С												
ротаметр		нагреватель			термо-эдс, мВ				температура, °С			
о.е.	V, л/ч	I, А	U, В	W, Вт	e_2 мВ	e_3 мВ	$e_4^{\text{сух}}$ мВ	$e_4^{\text{мокр}}$ мВ	t_2 °С	t_3 °С	$t_4^{\text{сух}}$ °С	$t_4^{\text{мокр}}$ °С

Произвести подобные измерения при других режимах работы модели сушильной установки. Для изменения режима можно изменить напряжение питания нагревателя или изменить объемный расход воздуха, насадив на входное отверстие насадку. Перед записью показаний приборов необходимо дождаться теплового равновесия в калорифере.

4.3. Обработка результатов измерений.

Для каждого из опытов нанести на h - d - диаграмме изменение состояния воздуха в процессе (рис.3):

- исходная точка 1, соответствующая состоянию воздуха в помещении, находится по показаниям психрометра и психрометрического графика, по h - d -диаграмме определяем влагосодержание d_1 ;

- процессу нагрева воздуха в калорифере соответствует вертикальная прямая 1-2 до температуры t_2 , поскольку содержание влаги остается неизменным;

- по показаниям “сухой” и “мокрой” термопар, расположенных в воздухопроводе, используя психрометрический график, определяем относительную влажность воздуха на выходе φ_4 ;

- на h - d -диаграмме ставим точку 4 на пересечении изолиний $\varphi_4 = const$ и $t_4^{сух} = const$ и определяем влагосодержание воздуха d_4 на выходе из сушильной камеры;

- находим на h - d -диаграмме точку 3, соответствующую состоянию воздуха на выходе из сушильной камеры, проводя прямую 4 – 3 при постоянном влагосодержании до пересечения с изотермой t_3 , соответствующей температуре воздуха на выходе из сушильной камеры. В этом случае истинная линия процесса испарения проходит через точки 2 – 3 и не совпадает с изоэнтальпийной из-за потерь.

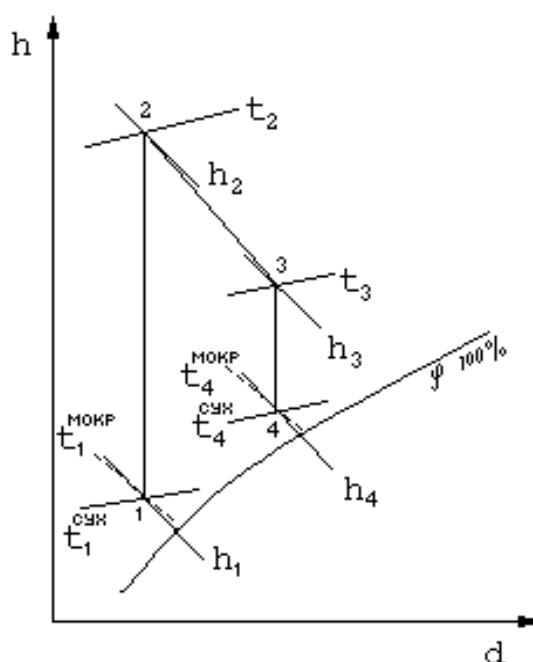


Рис.3. Изменение состояния воздуха в процессе сушки.

Для каждого из режимов произвести следующие расчеты:

Исходные данные:

- барометрическое давление B ,
- температура воздуха на входе в калорифер t_1 ,

- относительная влажность воздуха в исходном состоянии (по психрометру);

- значение энтальпии воздуха в разных точках установки h_1, h_2, h_3 определяем по $h-d$ -диаграмме;

- влагосодержание в начале d_1 и в конце d_3 процесса – по $h-d$ – диаграмме;

- объемный расход воздуха $V, \text{ м}^3/\text{с}$;

- электрическая мощность калорифера W .

Необходимые расчеты:

- определяем парциальное давление пара в исходном воздухе

$$p_{\text{п}} = \frac{B d_1}{d_1 + 622}, \text{ Н/м}^2,$$

- парциальное давление сухого воздуха $p_{\text{сух.возд.}} = B - p_{\text{п}}$,

- массовый расход сухого воздуха $m_{\text{сух.возд.}} = \frac{p_{\text{сух.возд.}} V_{\text{возд.}}}{R_{\text{сух.возд.}} T_1}, \text{ кг/с}$,

- количество влаги, испаренной в сушильной камере

$$m_{\text{вод}} = 0.001(d_3 - d_2)m_{\text{сух.возд.}}, \text{ кг/с},$$

- количество тепла, подведенного к воздуху в калорифере в единицу времени $Q_k = m_{\text{сух.возд.}}(h_2 - h_1), \text{ Вт}$,

- тепловые потери в калорифере $Q_k^{\text{пот}} = W - Q_k, \text{ Вт}$,

- потери тепла в сушильной камере

$$Q_{\text{суш.кам.}}^{\text{пот}} = m_{\text{сух.возд.}}(h_2 - h_3), \text{ Вт},$$

- расход тепла на испарение 1 кг воды $q = \frac{Q_k - Q_{\text{суш.кам.}}^{\text{пот}}}{m_{\text{сух.возд.}}(d_3 - d_1)}, \text{ Дж/кг}$.

Полученное значение следует сравнить с табличным значением теплоты парообразования.

- расход энергии для испарения 1 кг воды в установке

$$q_{\text{уст}} = \frac{W}{m_{\text{сух.возд.}}(d_3 - d_1)},$$

- коэффициент полезного действия экспериментальной установки

$$\eta = \frac{q}{q_{\text{уст}}}.$$

Замечание: при расчетах подставлять значения физических величин в системе СИ, в частности, значения влагосодержания перевести в кг.

5. Содержание отчета.

- Название и цель работы.

- Теплотехническая схема установки.

- Таблицы измеренных данных.

- $h-d$ диаграмма с нанесенными на нее процессами изменения состояния воздуха в установке.

- Необходимые расчеты. Расчеты для каждого режима рекомендуется свести в таблицу. При этом для одного из режимов расчеты привести с соответствующими формулами и подстановкой числовых значений.

- Выводы.

6. Задачи для самостоятельного решения.

Задача 1. Определить относительную влажность воздуха в лаборатории.

Задача 2. Воздух днем нагрелся до температуры 24°C . Относительная влажность воздуха была 0.45. До какой температуры охлаждается воздух ночью, если происходит образование тумана?

Задача 3. Определить параметры влажного воздуха при температуре 60°C и относительной влажности $\varphi = 0.60$, если барометрическое давление 740 мм.рт.ст.

Найти следующие параметры: энтальпию воздуха, влагосодержание, температуру точки росы, парциальное давление водяных паров и сухого воздуха

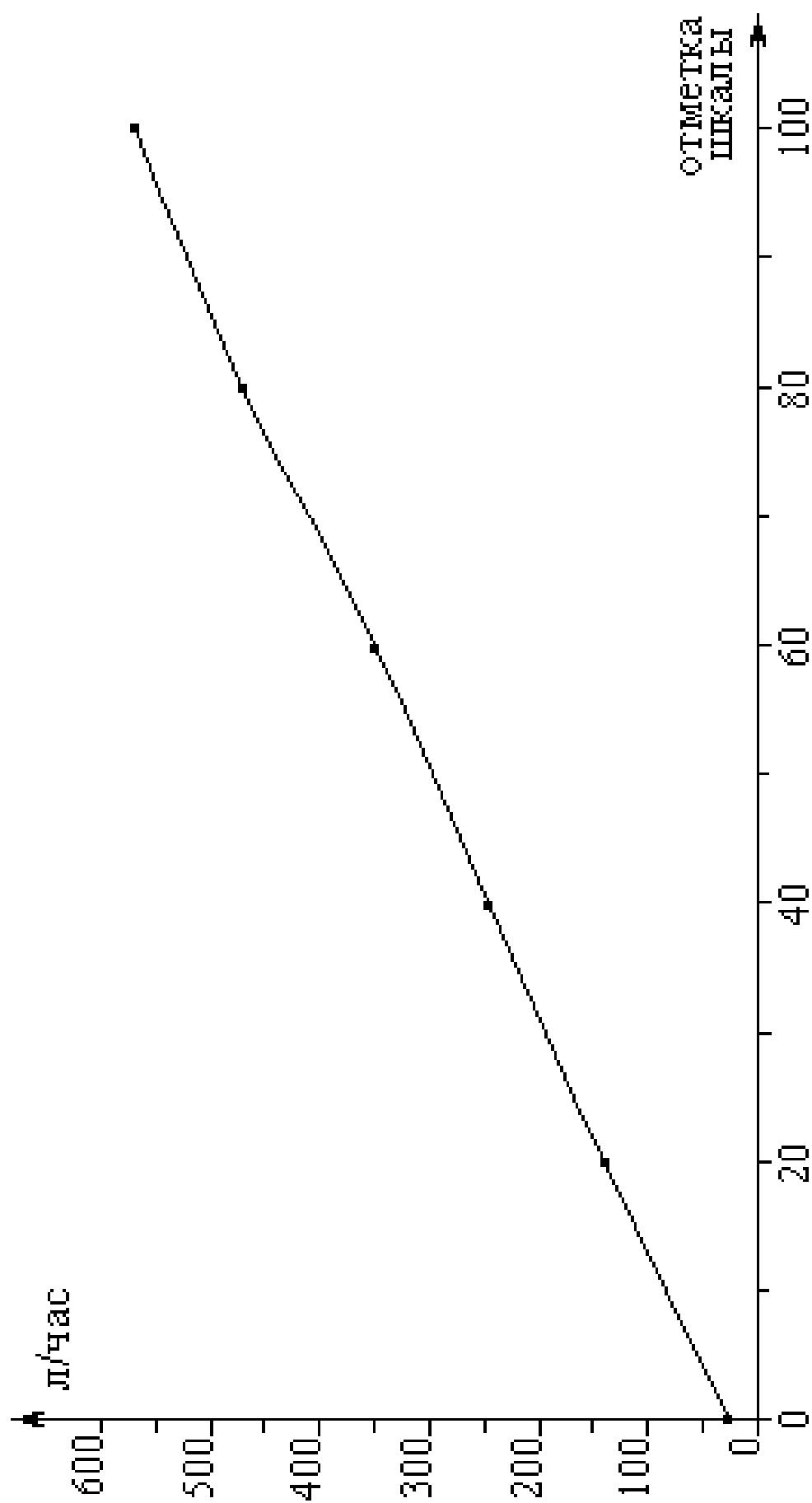
Задача 4. В калорифер сушильной установки подается атмосферный воздух при температуре 22°C и относительной влажности $\varphi = 0.6$, где он подогревается до температуры 95°C . Подогретый воздух направляется в сушильную камеру, откуда выходит с температурой 32°C . Определить конечное влагосодержание воздуха, расход воздуха (кг воздуха на кг испаренной влаги) и расход тепла для испарения 1 кг влаги. Потерями тепла в сушильной установке пренебречь.

Контрольные вопросы.

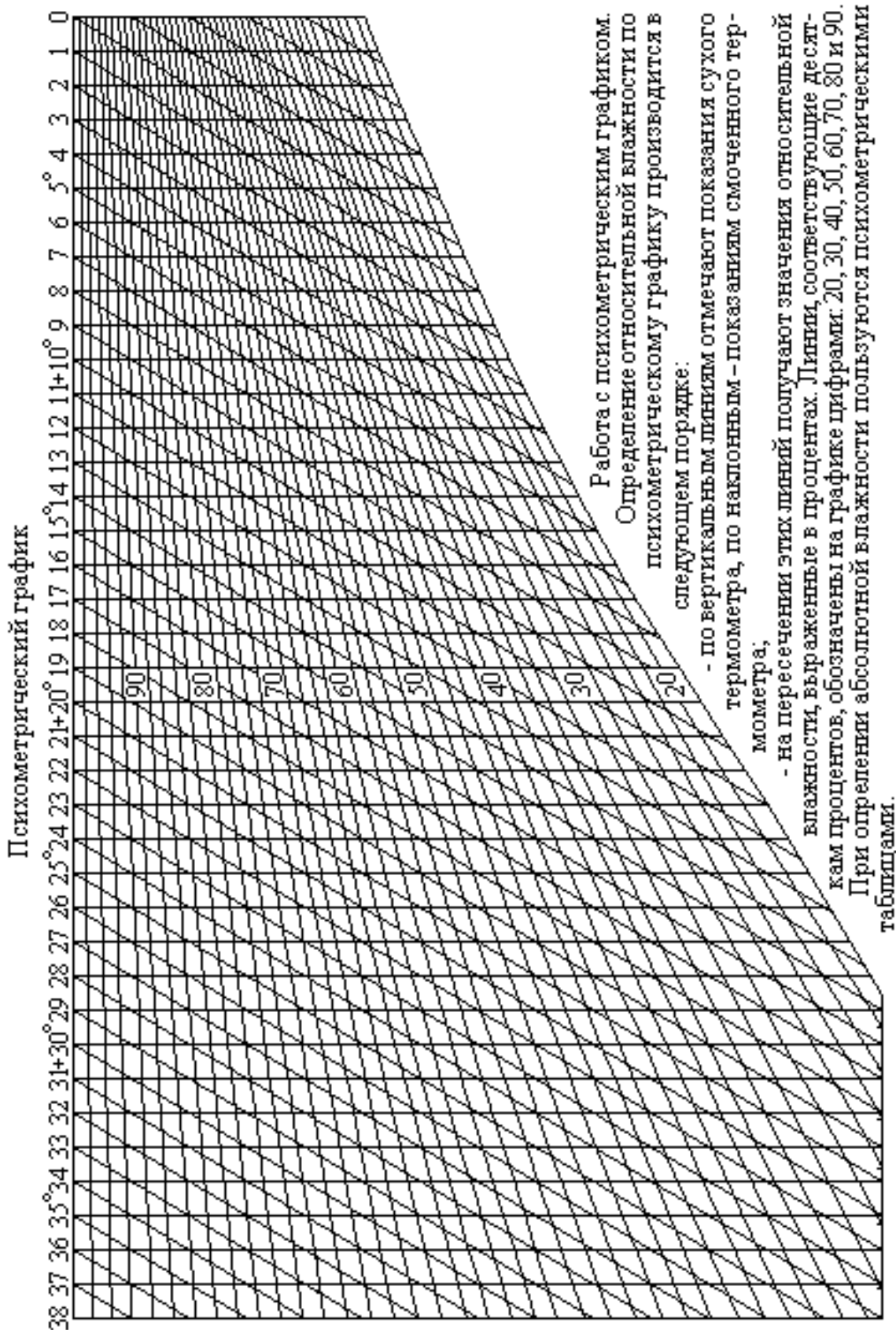
1. В чем разница между сухим, влажным и насыщенным влажным воздухом?
2. Поясните принцип работы психрометра.
3. Изолинии каких величин изображены на $h-d$ – диаграмме?
4. Какие характеристики установки влияют на точность оценки теплоты парообразования воды?
5. Как выбрана точка отсчета энтальпии на $h-d$ – диаграмме?
6. Почему с увеличением температуры воздуха его относительная влажность уменьшается?
7. Покажите на диаграмме и поясните процесс адиабатного насыщения влажного воздуха.
8. Что такое точка росы? Как определить температуру точки росы на диаграмме?

Ротаметр №3080

График определения расхода по газу



Приложение Б Психрометрический график.



Приложение В. Таблица перевода термо-эдс хромель-копелевой термопары.

ТЭДС в мВ при температуре свободного конца 0°C										
t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,063	0,127	0,190	0,254	0,318	0,382	0,446	0,510	0,575
10	0,639	0,704	0,768	0,833	0,898	0,963	1,028	1,093	1,159	1,224
20	1,290	1,355	1,421	1,421	1,553	1,619	1,685	1,752	1,818	1,885
30	1,951	2,018	2,085	2,152	2,210	2,286	2,354	2,421	2,488	2,556
40	2,624	2,692	2,759	2,828	2,896	2,964	3,032	3,101	3,169	3,238
50	3,306	3,375	3,444	3,513	3,582	3,652	3,721	3,790	3,860	3,929
60	3,999	4,069	4,139	4,209	4,279	4,349	4,419	4,490	4,560	4,631
70	4,701	4,772	4,843	4,914	4,985	5,056	5,127	5,198	5,270	5,341
80	5,413	5,484	5,556	5,628	5,700	5,772	5,844	5,916	5,988	6,060
90	6,133	6,205	6,278	6,351	6,423	6,496	6,569	6,642	6,715	6,788
100	6,862	6,935	7,008	7,082	7,155	7,229	7,303	7,377	7,451	7,525
110	7,599	7,673	7,747	7,821	7,896	7,970	8,045	8,119	8,194	8,269
120	8,344	8,419	8,494	8,569	8,644	8,719	8,794	8,870	8,945	9,021
130	9,096	9,172	9,248	9,324	9,400	9,476	9,552	9,628	9,704	9,780
140	9,857	9,933	10,010	10,086	10,163	10,239	10,316	10,393	10,470	10,547
150	10,624	10,701	10,778	10,956	10,933	10,010	11,088	11,165	11,243	11,321
160	11,398	11,476	11,554	11,632	11,710	11,788	11,866	11,944	12,023	12,101
170	12,179	12,258	12,336	12,415	12,494	12,572	12,651	12,730	12,809	12,888
180	12,067	13,046	13,125	13,204	13,294	13,363	13,442	13,522	13,601	13,681
190	13,761	13,840	13,920	14,000	14,080	14,160	14,240	14,320	14,400	14,480

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФГБОУ ВО «УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт нефти и газа им. М.С. Гуцериева
Кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых скважин

**ОТЧЕТ
ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

-----**(наименование и №)**-----

По дисциплине: Техническая термодинамика и теплотехника.

Лабораторный практикум.

**Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника
профиль «Тепловые электрические станции»**

Студента группы _____ ФИО
Руководитель практикума _____ ФИО

Отчет проверил «__» _____ 2019г. _____

Отчет защищен «__» _____ 2019г.
с оценкой _____

Ижевск
2018

Список литературы

1. Мирам А.О., Павленко В.А. Техническая термодинамика. Тепло-массообмен. – М.: Издательство АСВ. 2017.
2. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Альянс, 2015.
3. Андрианова Т.Н., ДзамповБ.И., Зубарев В.Н., Ремизов С.А., Филатов Н.Я. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Издательство МЭИ, 2000.
4. Кириллин В.А. Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Наука, 1979.
5. Александров А.А., Зубарев В.Н., Охотин В.С. Практикум по технической термодинамике: Учеб. пособие для вузов, 3-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Алтунин В.В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. М.: Изд-во стандартов, 1975.
7. Александров А.А., Ривкин С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980.
8. Лариков Н.Н. Общая теплотехника. – М. Издательство литературы по строительству. 1966
9. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства газов. – М.: Энергия, 1973

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
Лабораторная работа №1	10
Лабораторная работа №2	19
Лабораторная работа №3	32
Лабораторная работа №4	39
Лабораторная работа №5	47
Лабораторная работа №6	57
Приложение А	65
Приложение Б	66
Приложение В	67
Приложение Г	68
Список литературы	69

Учебное издание

Составители:

Бартенев Олег Архипович
Мезрин Владимир Васильевич
Жуков Владимир Константинович

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА
Лабораторный практикум.
Часть I. Термодинамические процессы.
Под ред. канд. физ.-мат. О.А. Бартенева.

Авторская редакция

Подписано в печать 00.00.00. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 0,00. Уч.-изд. л. 0,00.
Тираж 00 экз. Заказ № 0000.

Издательство «Удмуртский университет»
426034, Ижевск, Университетская, д. 1, корп. 4, каб. 207
Тел./факс: + 7 (3412) 500-295 E-mail: editorial@udsu.ru