

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ**

Учебное пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2016

УДК 621.1016+621.56

ББК 31.31я73

Л 12

Лабораторный практикум по термодинамике / А.В. Клёцкий, О.Б. Цветков, В.В. Митропов и др.; под ред. О.Б. Цветкова, В.В. Митропова: Учеб. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 89 с.

Приведены правила техники безопасности, сведения об измерительных приборах и методах, используемых при выполнении лабораторных работ. Содержит задания, теоретические сведения, описание метода, хода выполнения и отчета о проделанной работе.

Предназначен для студентов направлений: 14.03.01 по дисциплине «Термодинамика»; 15.03.04, 16.03.03, 23.03.03 – «Основы термодинамики и теплопередачи»; 15.03.02 – «Термодинамика и теплообмен»; 19.03.01 – «Основы термодинамики и теплопереноса»; 19.03.03 – «Теоретические основы тепло- и хладотехники» всех форм обучения.

Рецензент: кафедра теоретических основ теплотехники НИУ СПбГПУ (зав. кафедрой доктор техн. наук, проф. С.З. Сапожников); доктор техн. наук, проф. Л.В. Галимова (кафедра холодильных машин Астраханского технического университета)

Рекомендовано к печати Советом факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования, протокол № 9 от 25.05.2015 г.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016

© Клёцкий А.В., Цветков О.Б., Митропов В.В. и др., 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

В лаборатории термодинамики кафедры «Теоретические основы тепло- и хладотехники» проводятся работы, которые дают возможность ознакомиться с методами измерения термодинамических параметров рабочих тел (температуры, энтальпии, степени сухости пара), методами установления зависимости между параметрами, а также методами исследования некоторых термодинамических процессов (изотермического, адиабатного, дросселирования, истечения).

При выполнении лабораторных работ по термодинамике производятся измерения температуры, давления, а также электрических величин – силы тока, напряжения, мощности, поэтому изучению работ, которые будут выполняться студентом в лаборатории, должно предшествовать тщательное ознакомление не только с экспериментальными установками, но и с принципом действия, устройством и порядком применения соответствующих приборов. Данные вопросы кратко излагаются во введении к практикуму и входят в содержание предварительного коллоквиума.

При выполнении лабораторных работ и соответствующих измерений необходимо соблюдать правила внутреннего распорядка и инструкции по технике безопасности.

В приложениях 1, 2, 3 к лабораторным работам приведены формы общих для всех лабораторных работ отчетных таблиц («Характеристика приборов», «Данные градуировки термодинамических характеристик веществ, необходимых для расчетов».) и элементы справочных таблиц термодинамических характеристик веществ, необходимых для расчетов.

В создании лаборатории термодинамики и разработке ее экспериментальных установок принимали участие: А.Г. Ткачев, Э.И. Гуйго, В.Н. Филаткин, Г.Н. Данилова, А.В. Клецкий, С.Н. Богданов, А.В. Куприянова, М.Г. Щербов, С.Я. Фогель, В.Н. Федоров, В.В. Митропов.

Авторы будут благодарны преподавателям и студентам за сообщения на кафедру ТОТХТ Университета ИТМО обо всех недочетах, обнаруженных при пользовании настоящим учебным пособием.

СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

V	– объем, м^3 , или объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$
v	– удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$
M	– масса, кг, или массовый расход, $\text{кг}/\text{с}$
p	– давление, Па, МПа
B	– атмосферное давление, гПа, мм рт. ст.
$p_{\text{абс}}$	– абсолютное давление, Па
ρ	– плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$
T	– температура по шкале Кельвина, К
t	– температура по шкале Цельсия, $^{\circ}\text{C}$
R	– удельная газовая постоянная, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
Q, q	– теплота, кДж, кДж/кг
U, u	– внутренняя энергия, кДж, кДж/кг
L, l	– работа, кДж, кДж/кг
h	– энтальпия, кДж/кг
s	– энтропия, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
h', u', s'	– энтальпия, внутренняя энергия и энтропия насыщенной жидкости, $\text{кДж}/\text{кг}$, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
h'', u'', s''	– энтальпия, внутренняя энергия и энтропия сухого насыщенного пара, $\text{кДж}/\text{кг}$, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
x	– степень сухости пара
r	– удельная теплота парообразования, $\text{кДж}/\text{кг}$
c	– удельная массовая теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
k	– показатель адиабаты
n	– показатель политропы
N	– мощность, Вт, кВт
ε	– холодильный коэффициент цикла
μ	– отопительный коэффициент цикла
w	– скорость движения, м/с
$w_{2\text{кр}}$	– критическая скорость истечения из сопла, м/с
β	– отношение давлений;
$\beta_{\text{кр}}$	– критическое отношение давлений
a	– скорость звука, м/с
f	– площадь, м^2

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ В УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ ТОТХТ

1. Не разрешается класть портфели, сумки и прочие вещи на учебные столы, где смонтированы приборы и установки. При входе в лабораторию все личные вещи должны быть сложены на отдельный стол.

2. Выполнение лабораторных работ без предварительной сдачи специального зачета по лабораторным работам (коллоквиума) и ознакомления с правилами техники безопасности не разрешается.

3. Приступить к выполнению работы можно только с разрешения лаборанта или преподавателя.

4. При выполнении лабораторных работ необходимо соблюдать дисциплину и порядок. Начало и конец работы, как и при других занятиях, определяются по звонку.

Приступив к работе, нельзя выходить из лаборатории до перерыва. Во время проведения работы студент должен находиться только на своем рабочем месте. Посторонние разговоры и шум в лаборатории недопустимы.

5. В случае нарушения нормальной работы установки не разрешаются устранение недостатков и регулировка без участия лаборанта.

6. После окончания работы необходимо предъявить преподавателю или лаборанту протокол выполненных наблюдений на проверку и подпись.

ВЫПИСКА ИЗ ПРАВИЛ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ ТОТХТ

1. Общие правила

Включение и выключение установок производится только с разрешения лаборанта или преподавателя. Запрещается оставлять работающую установку без присмотра.

Студенты, не знающие правил техники безопасности, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

2. Правила работы на установках, находящихся под избыточным давлением

При работе на установке, находящейся под избыточным давлением, необходимо следить за показаниями манометра, ни в коем случае не допускать превышения давления, указанного для данной работы в учебном пособии.

Если давление превысит допустимый предел, следует немедленно сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

При измерениях количества конденсата, а также при контроле уровня воды в кипятильниках следует остерегаться поломки водомерных стекол, так как при этом возможны ожоги горячей водой и паром.

3. Правила работы на установках, питаемых электричеством

ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

- включать и выключать силовые и осветительные рубильники без разрешения преподавателя или лаборанта;
- производить исправления в электросистемах, находящихся под напряжением;
- оставлять систему, находящуюся под напряжением, без присмотра;
- снимать и перевешивать предупреждающие и запрещающие плакаты;
- выключать блокировочные устройства;

– заходить и протягивать руки за ограждения во время работы установки;

– снимать заземляющие провода и работать с незаземленным электрооборудованием;

– касаться незаизолированных проводников, металлических клемм, обмоток реостатов и других деталей электросхем, находящихся под напряжением.

В случае возникновения пожара следует немедленно вызвать пожарную команду по пожарному сигналу или телефону 01 и приступить к тушению пожара своими силами. При этом необходимо:

– немедленно остановить установку и полностью выключить электроток;

– электропроводку тушить только углекислотными огнетушителями.

СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТАХ

Для измерения температуры газообразных, жидких и твердых тел могут быть применены жидкостные и газовые термометры, термоэлектрические термометры (термопары), термометры сопротивления металлические и полупроводниковые (термисторы), пирометры и другие приборы. В учебной лаборатории при выполнении работ по термодинамике в настоящее время используются жидкостные термометры и термопары.

Жидкостные термометры

Жидкостные термометры применяются при измерении температур от минус 60 до плюс 750 °С. Преимуществом термометра является возможность отсчета температуры непосредственно по его шкале.

Недостатки данного прибора состоят в большой тепловой инерции и значительном влиянии на его показания температуры окружающей среды (как правило, воздуха).

Термометры применяются для измерения температур жидкостей и газов, когда установка термометра удобна, не вносит больших погрешностей в скоростное и температурное поля и не приводит к значительным погрешностям измерения. Из-за тепловой инерции жидкостные термометры не могут применяться для измерения быстро меняющихся температур, а также ввиду относительно больших размеров ампулы они непригодны для измерения температуры поверхности твердого тела или распределения температур по сечению трубы.

При выполнении лабораторных работ измерение температуры производится так называемым лабораторным термометром. Для научно-исследовательских и других работ большой точности применяют образцовые термометры. Цена деления лабораторных и образцовых термометров составляет от 1 до 0,01 °С.

Термометр, предназначенный для лабораторных измерений, должен быть снабжен свидетельством (паспортом), в котором указываются результаты поверки данного термометра по эталонному.

Поверка основных точек шкалы термометра может быть произведена в лаборатории путем погружения его в тающий лед (0 °С) и на-

сыщенный пар чистой воды, кипящей при давлении 101 кПа (100 °С). При этом термометр должен быть опущен в соответствующую среду в вертикальном положении до деления шкалы измеряемой температуры.

Термопары

Термопары могут применяться в более широком диапазоне температур, чем жидкостные термометры, а также в случаях, когда требуется определить температуру в точке или в месте, недоступном для установки термометра. Термопары обладают важным преимуществом дистанционного измерения температуры (рис. 1).

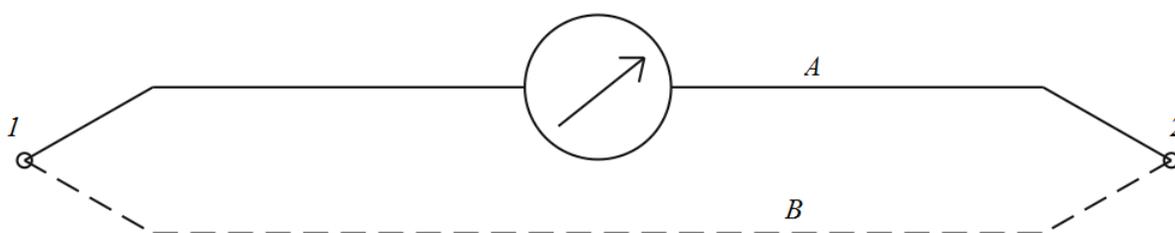


Рис. 1. Термопара:
1 – холодный спай; 2 – горячий спай

Действие термопары основано на том, что в цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников *A* и *B*, при наличии разности температур в местах соединения 1 и 2 этих проводников, возникает электродвижущая сила (ЭДС).

Два проводника, в которых может при этих условиях возникать ЭДС, называются термоэлектрической парой; ЭДС зависит от свойства проводников и температуры мест их соединения t и t_0 . Проводники соединяются путем пайки или сварки. Места соединений проводников называются «спаями». Если температуру одного из спаев t_0 поддерживать постоянной, то величина ЭДС E , развиваемая термопарой, зависит только от температуры другого спая t . Спай, температура которого поддерживается при измерении постоянной, называется «холодным», а спай, помещенный в место измерения температуры, – «горячим». Функциональная зависимость $E = f(t)$ определяется опытным путем. Электродвижущая сила E , возникающая в цепи термопары, невелика (от 40 до 70 мкВ на 1 К). Она может быть измерена посредством электроизмерительного прибора.

Наиболее распространенными в лабораторной практике термоэлектрическими парами при измерении температур от минус 200 до плюс 100–600 °С являются медьконстантан и железоконстантан. Толщина проволоки, применяемой для термопар, выбирается по возможности малой (0,1–0,5 мм) для уменьшения отвода теплоты по проводнику и тепловой инерции.

Термопары могут применяться как для измерения температуры, так и для измерения разности температур. Если ставится задача определить разность температур в каких-то двух точках, то горячий спай помещается в одну из них, холодный – в другую. По измеряемой ЭДС определяется искомая разность температур. Такая термопара называется дифференциальной.

Термопара обычно подвергается предварительной градуировке.

Зависимость между ЭДС и температурой горячего спая $E = f(t)$ (при постоянной температуре холодного спая) может быть представлена в виде таблицы или графика. Такой график называется градуировочной кривой.

Поместив горячий спай в точку измерения температуры, холодный спай – в сосуд Дьюара (термос со льдом) и отметив показания прибора, по градуировочной таблице или графику можно определить соответствующую температуру.

Измерение давления

Для измерения давления в лаборатории используются пружинные приборы.

Устройство пружинных приборов для измерения давления основано на изменении упругой деформации под действием давления или разрежения скрученной полой пружины (манометры и вакуумметры с трубкой Бурдона) или эластичной тонкой пластины – мембраны (барометр «анероид»).

Основной частью трубчатого манометра является изогнутая пустотелая трубка овального сечения. Свободный конец трубки закрыт наглухо, а закрепленный открытый конец соединяется с пространством, в котором измеряется давление. При увеличении давления трубка слегка разгибается. К свободному концу трубки присоединяется передающий механизм со стрелкой. После градуировки шкалы манометра (по показаниям образцового прибора) он может быть применен для измерения избыточного давления. Трубка Бурдо-

на используется также и для измерения вакуума. Трубочатые манометры применяются для измерения давления до 500 МПа.

Необходимо помнить, что пружинные манометры *не позволяют измерять непосредственно истинное (абсолютное) давление $p_{абс}$ в сосуде, а показывают лишь разницу между ним и атмосферным давлением.*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ И ДАВЛЕНИЕМ НАСЫЩЕННОГО ПАРА ХЛАДАГЕНТА R12

1. Задание

1. Составить четкое представление о каждом из возможных состояний жидкости и пара (насыщенная и ненасыщенная жидкости, влажный, сухой насыщенный и перегретый пар, критическое состояние), а также о физическом смысле и взаимосвязи основных величин, определяющих ход процесса кипения: температуры насыщения, удельной теплоты парообразования, степени сухости влажного пара.

2. Определить экспериментально зависимость давления от температуры для насыщенного пара хладагента R12 при изменении давления от 0,5 до 0,8 МПа. Провести аппроксимацию опытных данных.

3. Использовать полученное уравнение $p = f(T)$ для расчета теплоты парообразования хладагента R12.

2. Основные теоретические понятия

Хладагенты относятся к классу галоидных производных насыщенных углеводородов. Так, хладагент R12 может быть получен при замещении атомов водорода в молекуле метана CH_4 двумя атомами фтора и двумя атомами хлора.

Химическая формула хладагента R12 – CF_2Cl_2 . При атмосферном давлении хладагент R12 – газ без цвета и запаха. При понижении температуры до минус 30 °С хладагент R12 конденсируется под давлением 0,1 МПа (750 мм рт. ст.), а при дальнейшем понижении температуры до минус 156 °С он затвердевает.

За последние десятилетия хладагенты нашли широкое применение в различных областях техники, в особенности при получении искусственного холода.

Попадая в испаритель холодильной машины, жидкий хладагент R12 кипит и при этом отнимает теплоту от тел, подлежащих охлаждению. Очевидно, что каждый килограмм насыщенной жидкости хладагента R12, выкипая и превращаясь в сухой насыщенный пар, может отнять от охлаждаемых тел количество теплоты, равное удельной теплоте парообразования.

Каждому давлению p_n хладагента R12 соответствует определенная температура кипения, называемая температурой насыщения. Так, если в испарителе холодильной машины поддерживать давление, равное 0,1 МПа, то находящийся там хладагент R12 будет кипеть при температуре минус 30 °С. Если давление в испарителе повысить, например, до 0,26 МПа, то кипение жидкого хладагента R12 и превращение его в пар будет происходить при температуре минус 5 °С.

Кривая парообразования по форме обычно близка к экспоненте, но для каждого вещества имеет индивидуальные особенности. Однако температура кипения всех жидкостей возрастает с повышением давления. Для хладагента R12 зависимость между температурой и давлением при фазовом переходе из жидкого состояния в газообразное показана на рис. 2. Справа от кривой расположена область перегретого пара, слева – область жидкости. Вся область влажного пара (двухфазного состояния) изобразится на диаграмме $p-T$ этой кривой фазового перехода.

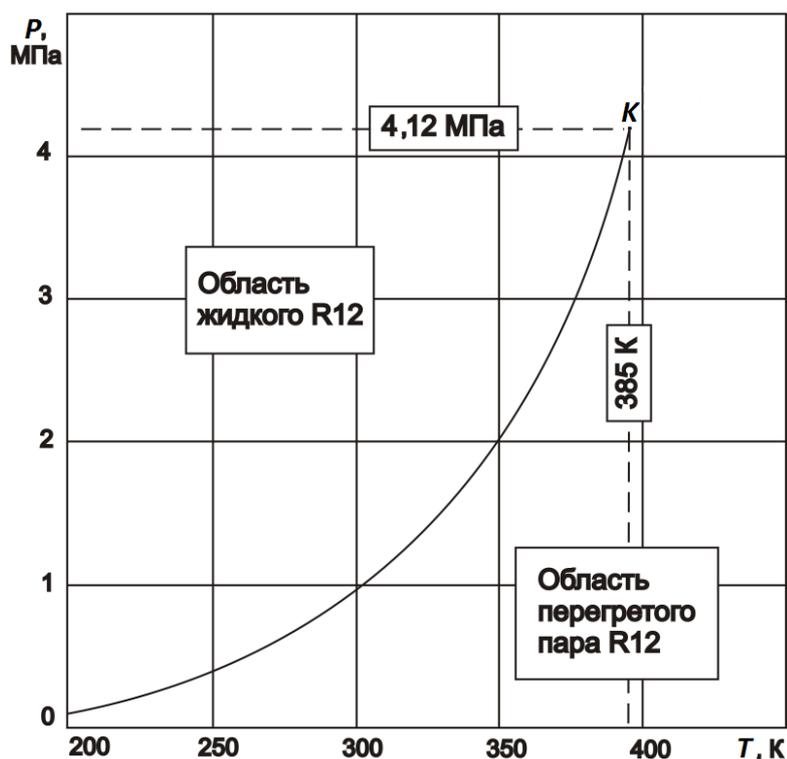


Рис. 2. Диаграмма $p-T$ для хладагента R12

Точка K называется критической точкой. При значениях параметров больших p_k или T_k (для хладагента R12 $p_k = 4,12$ МПа, $T_k = 385$ К

и $v_k = 1,76 \text{ см}^3/\text{г}$), скачкообразный переход из жидкого в парообразное состояние (или наоборот) не имеет места, так как за пределами точки K рабочее тело однородно и четко выраженных состояний жидкости и пара уже не существует. Критическая температура хладагента R12 сравнительно высока ($+112 \text{ }^\circ\text{C}$), поэтому в условиях практического применения он рассматривается как реальный газ. Ожижение хладагента R12 в конденсаторе может происходить только при температурах ниже критической.

3. Лабораторная установка

В данной лабораторной работе зависимость давления насыщения от температуры определяется по методу кипения. Для проведения измерений по этому методу обеспечивается весьма медленное изменение температуры и давления влажного пара, заполняющего пространство над жидкостью (жидкость кипит, а образующийся из нее пар конденсируется). Схема установки изображена на рис. 3.

Основной элемент установки – кипятильник-конденсатор, который представляет собой закрытый вертикально расположенный полый цилиндр, выполненный из малотеплопроводной нержавеющей стали. Верхняя часть указанного цилиндра является конденсатором, она охвачена змеевиком 2, внутри которого циркулирует водопроводная вода, отводящая теплоту конденсации пара хладагента. Смотровое окно 5 позволяет наблюдать процесс кипения хладагента во время опыта. В нижней части корпуса, служащей кипятильником, находится электронагреватель 6. Он представляет собой теплопроводный кожух, внутри которого находится электрическая спираль. На крышке кипятильника расположен вентиль для заполнения установки хладагентом и установки манометра 1. На шкале манометра имеется красная черта, указывающая предельно допустимое давление в установке ($p_{\text{изб}} = 0,9 \text{ МПа}$). Для того чтобы исключить опасное повышение давления, на установке имеется предохранительный клапан.

Температура паров хладагента R12 измеряется с помощью термопары. Ее горячий спай 4 введен в верхнюю часть кипятильника-конденсатора. Спай окружен экраном 3 для исключения влияния радиационного теплообмена с корпусом аппарата. Холодный спай термопары помещен в сосуд Дьюара, который перед пуском установки заполняется измельченным льдом с водой. Сила тока в цепи регулируется с помощью реостата 7.

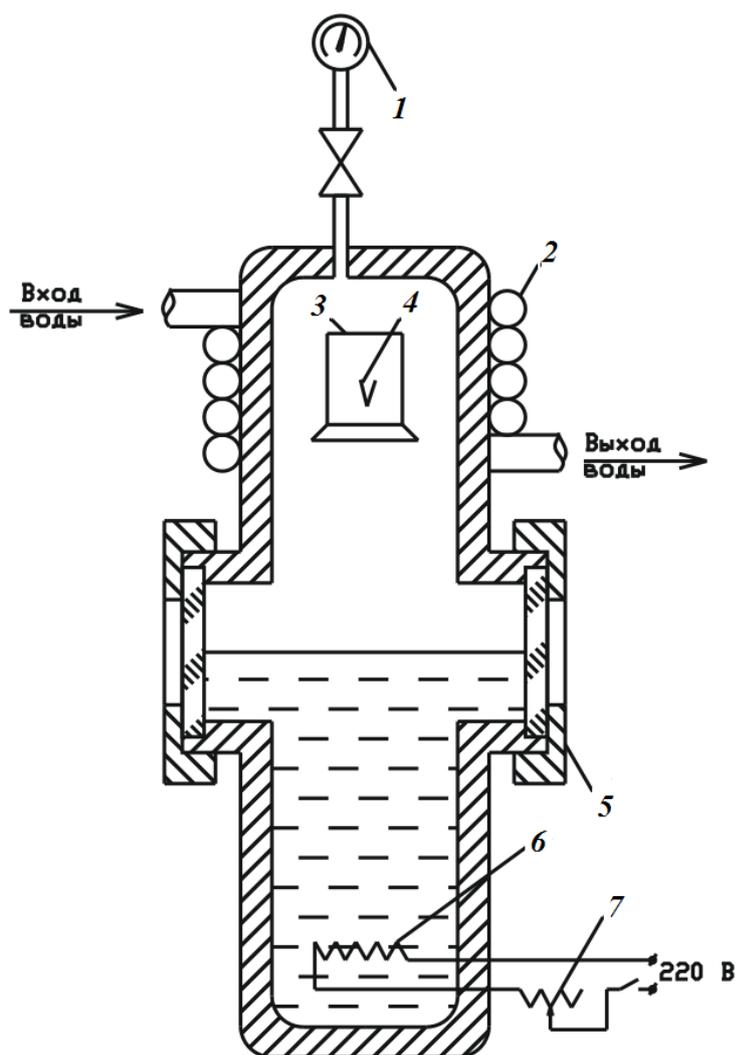


Рис. 3. Схема лабораторной установки:
 1 – манометр; 2 – змеевик; 3 – экран; 4 – горячий спай;
 5 – смотровое окно; 6 – электронагреватель; 7 – реостат

После сборки и гидравлического испытания установки из кипятильника-конденсатора удаляют воздух и заполняют жидким хладагентом R12 до уровня верхнего края смотровых окон.

Установка работает следующим образом.

Выделяемая электронагревателем теплота вызывает кипение хладагента; полученный влажный насыщенный пар поднимается вверх, достигая конденсатора, где, охлаждаясь, конденсируется на стенках и стекает обратно в холодильник.

При указанном уровне заполнения аппарата и в пределах установленного максимального рабочего давления 1 МПа в пар может

быть превращена лишь незначительная часть жидкого хладагента R12. Следовательно, при указанных условиях работы на данной установке может быть получен лишь влажный насыщенный пар.

Давление насыщения изменяется в зависимости от температуры, которая, в свою очередь, зависит от мощности электронагревателя, температуры и расхода воды в конденсаторе. Мощность электронагревателя определяется силой протекающего через него тока и может регулироваться реостатом.

Таким образом, регулируя работу нагревателя и конденсатора, можно получить любое давление в пределах установленного для данного аппарата безопасного максимума и определить температуру пара, соответствующую этому давлению.

Невозможность получения в установке сухого насыщенного пара не имеет значения, ибо, как известно, и у влажного пара, и у сухого насыщенного зависимости между давлением и температурой одинаковы.

4. Выполнение работы

Приступая к работе, необходимо:

- ознакомиться с устройством и принципом действия опытной установки;
- ознакомиться с применяемыми в работе измерительными приборами и занести в таблицу характеристику приборов (см. прил. 1);
- выписать данные градуировки термопары из градуировочной таблицы (см. прил. 2).

Измеренные величины необходимо записать в протокол наблюдений (табл. 1).

Для установления точной зависимости между давлением и температурой пара следовало бы произвести измерение этих параметров при нескольких различных режимах кипения, каждый из которых являлся бы стационарным, т. е. таким, когда количество теплоты, воспринимаемой жидкостью, а также температура и давление пара остались бы постоянными во времени. Однако на учебной установке при отсутствии автоматического регулирования силы тока в электронагревателе или количества охлаждающей воды в конденсаторе выполнение такого опыта потребовало бы слишком много времени. Поэтому в данной работе измерение давления и температуры пара производится при медленном повышении или понижении указанных параметров.

Протокол наблюдений

Атмосферное давление $B =$ мм рт. ст.

№ пп.	Показания приборов	Номер измерения									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Давление по манометру, дел.										
2	ЭДС термопары, мВ										

Рабочая зона установки ограничена пределами давления насыщенных паров хладагента от 0,4 МПа (что соответствует температуре 8 °С) до 1 МПа (температура пара – приблизительно +41 °С).

Начинать измерения следует с давления 0,4–0,5 МПа и вести их до 1 МПа с интервалом 0,05–0,1 МПа. ПРЕВЫШАТЬ ДАВЛЕНИЕ 1 МПа ЗАПРЕЩАЕТСЯ. В случае перехода стрелки манометра за красную черту необходимо немедленно выключить ток и увеличить поступление воды в конденсатор.

Если в момент начала работы давление в установке достигло максимально допустимого, то следует увеличить приток воды в конденсатор или уменьшить силу тока в электронагревателе таким образом, чтобы давление пара в аппарате начало медленно снижаться, и вести замеры с теми же интервалами, какие рекомендованы выше.

Для получения зависимости $p = f(T_n)$ с удовлетворительной точностью в условиях нестационарного процесса кипения важно производить измерения температуры и давления ОДНОВРЕМЕННО. Измерение давления при положении стрелки манометра в промежутке между двумя делениями шкалы связано с повышением погрешности отсчета. Поэтому измерения производятся следующим образом: при приближении стрелки манометра к очередному делению шкалы заранее записывают значение данного деления; затем – также заранее – при помощи кнопки или ключа включают термопару в цепь прибора для измерения ЭДС и по достижении стрелкой манометра линии деления быстро делают отсчет показания цифрового милливольтметра.

Для определения абсолютного давления пара необходимо знать атмосферное давление; так как оно изменяется относительно

медленно, его достаточно измерить один раз – в начале опыта. Измерение производится при помощи барометра.

5. Обработка результатов опыта

Полученные в результате измерений опытные данные обрабатываются таким образом, чтобы наглядно выявить зависимость $p = f(T_n)$ и сравнить данную опытную зависимость с точными справочными данными, установленными рядом теоретических и экспериментальных научно-исследовательских работ.

Обработка производится в следующем порядке.

Для каждого из состояний пара, при которых производились измерения, рассчитывают абсолютную температуру пара и жидкости, а также абсолютное давление пара.

Для расчета абсолютной температуры предварительно определяют температуру по стоградусной шкале при помощи графика $t = f(E)$, который строят на основании градуировочной таблицы (график на миллиметровой бумаге прилагается к отчету о выполнении работы). Абсолютное давление рассчитывают с учетом действительного барометрического давления. По ходу обработки результатов расчеты систематизируют в таблице, форма которой приведена ниже (табл. 2).

Таблица 2

Результаты обработки опытных данных

Номер измерения	$p_{\text{изб}}$ (по манометру), МПа	$p_{\text{абс}}$, МПа	t , °С	T , К	$T_{\text{табл}}$, К	$p_{\text{табл}}$, МПа	ΔT , К	$\delta_T =$ $= \Delta T / T_{\text{табл}}$
1								
2								
3								
...								

Полученные опытные данные наносят на КРУПНОМАСШТАБНЫЙ график $p_{\text{абс}}-T$, выполняемый на миллиметровой бумаге. По согнутой линейке проводят плавную линию, осредняющую опытные точки. Для сопоставления полученной из опыта зависимости со справочными данными выписывают из таблиц термодинамических свойств хладагента R12 в состоянии насыщения значения температур

от плюс 10 до плюс 50 °С (с шагом 5–10 °С) и соответствующие им значения давления насыщения. По этим данным пересечением вертикальных и горизонтальных штрихов строят точки, соответствующие табличной информации. Точно через середины пересечений проводят вторую кривую по согнутой линейке. Подписывают кривые. По второй кривой для четырех–пяти произвольно выбранных опытных значений температур определяют значения давления $T_{\text{табл}}$, которые заносят в представленную выше таблицу. Там же записывают разности ΔT между измеренными и справочными значениями температур, т. е. абсолютные погрешности опытных данных. Далее вычисляют и включают в таблицу относительные погрешности δ_T , полученные в ходе измерений значений температур насыщения.

Среднее отклонение опытных температур от табличных, при котором результаты опыта могут считаться удовлетворительными, не должно превышать (приблизительно) 3 %.

6. Дополнительная обработка опытных данных

На основании проведенного анализа необходимо сделать краткие выводы о характере зависимости $p = f(T_n)$, качестве полученных данных и возможных причинах их отклонения (в том или другом направлении) от действительных.

Полученные опытные данные нужно использовать для расчета теплоты парообразования хладагента R12 при температуре плюс 20 и плюс 50 °С (или других температурах по указанию преподавателя). Для этого обычно выполняют аппроксимацию опытных данных, например, с помощью метода наименьших квадратов, и получают уравнение кривой парообразования. Аналогичный результат может быть получен графическим осреднением опытных данных в координатах $\ln p - 1/T_n$ на крупномасштабном графике, построенном на миллиметровой бумаге. В указанных координатах кривую парообразования можно считать в первом приближении прямолинейной. На этот график, кроме опытных точек, наносят критическую точку, параметры которой $T_{\text{кр}}$ и $p_{\text{кр}}$ берут из справочника [1]. Через критическую точку проводят прямую так, чтобы она осредняла опытные данные. Уравнение этой линии

$$\ln p = \ln p_{\text{кр}} - c (1/T_n - 1/T_{\text{кр}}).$$

Для вычисления коэффициента c в уравнение подставляют параметры p и T_n одной из опытных точек (близкой к осредняющей прямой) или параметры произвольной точки, взятой на этой линии.

Дифференцируя представленное выше уравнение, находят формулу для расчета уклона кривой парообразования

$$dp / dT_n = cpT_n^{-2}.$$

Вычисляют уклон для заданных температур и, используя справочные значения удельных объемов v' и v'' , находят значения теплоты парообразования по уравнению Клапейрона–Клаузиуса

$$r = T_n(v'' - v') dp/dT_n.$$

Определяют расхождения между ними и соответствующими значениями по справочнику [1].

7. Отчет о работе

По окончании работы составляют отчет, который должен содержать:

- схему опытной установки с краткой спецификацией основных ее элементов;
- характеристику приборов;
- данные градуировки термопар и график $t = f(E)$;
- протокол наблюдений;
- результаты обработки опытных данных (см. табл. 2);
- графическое представление опытной и табличной зависимостей $p = f(T_n)$ на миллиметровой бумаге с указанием масштабов;
- графическое представление опытных данных в координатах $\ln p - 1/T_n$ на миллиметровой бумаге;
- расчет теплоты парообразования хладагента R12 и сопоставление полученных значений r с табличными данными;
- анализ опытных данных и выводы по результатам работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ И ДАВЛЕНИЕМ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА

1. Задание

1. Составить четкое представление о каждом из возможных состояний жидкости и пара (ненасыщенная и насыщенная жидкости, влажный, сухой насыщенный и перегретый пар, критическое состояние), а также о физическом смысле и взаимосвязи основных величин, определяющих процесс кипения: температуры насыщения, давления насыщения, удельной теплоты парообразования, степени сухости влажного пара.

2. Определить экспериментально зависимость давления от температуры насыщения для водяного пара в интервале давлений от 0,1 до 0,5 МПа.

3. Полученные значения давлений насыщения сравнить с табличными значениями для соответствующих температур.

2. Основные теоретические понятия

Опытами установлено, что каждому давлению насыщения соответствует определенная температура кипения или насыщения чистой жидкости и наоборот, т. е. между температурой и давлением кипения или насыщения существует однозначная зависимость.

Кривая парообразования (или насыщения) обычно по форме близка к показательной функции, но для каждого вещества имеет индивидуальные особенности. Давление насыщения всех жидкостей возрастает с повышением температуры.

Для водяного пара кривая парообразования приведена на рис. 4. Справа от кривой расположена область перегретого водяного пара, слева – область воды. Вся область влажного пара (двухфазных состояний) изобразится на диаграмме $p-T$ кривой фазового перехода.

Кривая парообразования имеет ограниченную протяженность между точками A и K . Точка A называется тройной точкой (для воды $p_A = 610$ Па и $T_A = 273,16$ К). При этих параметрах сосуществуют (находятся в термодинамическом равновесии) три различные фазы вещества (твердая, жидкая и парообразная).

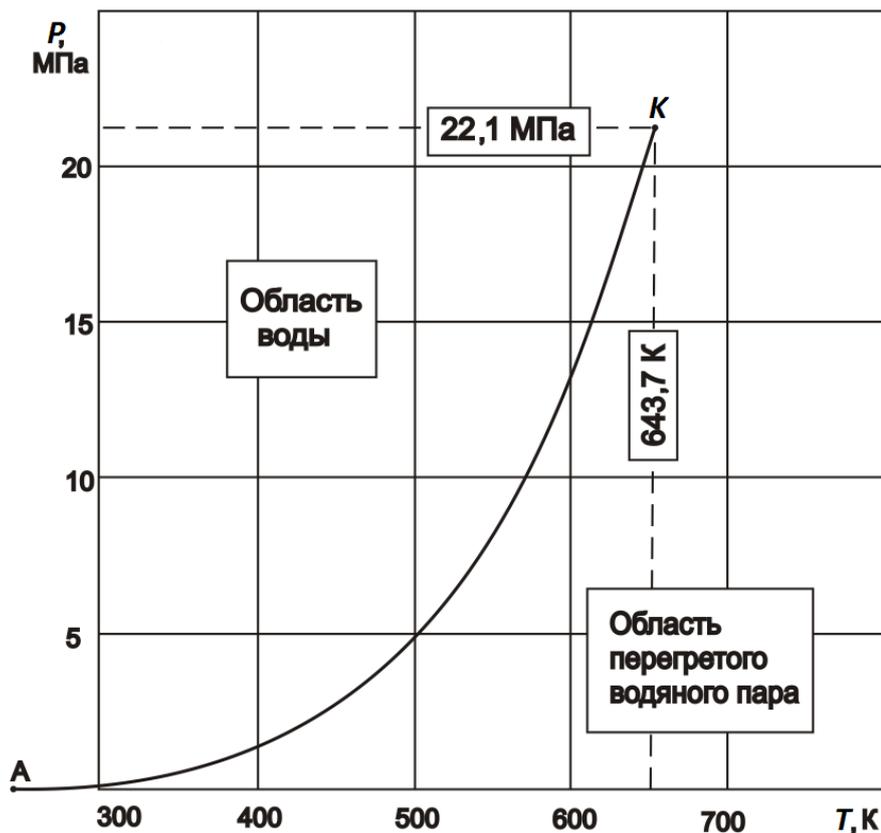


Рис. 4. Диаграмма p - T для водяного пара

Точка K называется критической точкой. В сверхкритической области, при значениях параметров больших p_k или T_k (например, для воды при давлении p_k более 22,1 МПа и температуре T_k свыше 647,3 К), скачкообразный переход из жидкого в парообразное состояние (или наоборот) не имеет места, так как за пределами точки K рабочее тело однородно и четко выраженных состояний пара и жидкости уже не существует.

Зависимость давления от температуры насыщения для водяного пара в интервале температур от 273 до 647 К получена на основании экспериментальных работ и приводится в таблицах для водяного пара [1].

3. Лабораторная установка

В данной лабораторной работе определение зависимости давления насыщения от температуры производится методом кипения, который заключается в измерении температуры и давления влажного пара, заполняющего пространство над жидкостью, кипящей на дне закрытого сосуда.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Основной частью установки является кипятильный аппарат, который представляет собой стальной сосуд, покрытый слоем изоляции и снабженный смотровым окном 5. Кипятильник обогревается спиралью электронагревателя 6. Ползунковый реостат 7 обеспечивает регулировку нагрева кипятильника; для удобства регулировки в цепь также включен вольтметр (на рисунке не показан). На верхнюю часть сосуда, выполняющую функции конденсатора, намотан змеевик 2, в который подается вода из водопроводной сети.

Для измерения избыточного давления используется манометр 1. Для измерения температуры применена медьконстантановая термопара, горячий спай 4 которой введен в верхнюю часть кипятильного аппарата. Цилиндрический экран 3 защищает спай термопары от лучистого теплообмена с холодными стенками корпуса. Холодный спай термопары помещен в сосуд Дьюара, заполняемый до начала лабораторной работы смесью измельченного льда с водой. Для измерения ЭДС термопары используется цифровой милливольтметр. Таблица градуировки термопары имеется в лаборатории.

Установка работает следующим образом. Лаборант предварительно заполняет кипятильный аппарат дистиллированной водой, подает ток на электронагреватель, а затем включает воду на конденсатор. Получаемый из воды влажный пар собирается в верхней части цилиндра кипятильного аппарата, являющейся конденсатором, а затем, охлаждаясь водой, протекающей через змеевик, сжижается и стекает вниз по стенкам сосуда.

Давление влажного пара изменяется в соответствии с температурой, которая зависит от мощности электронагревателя, а также от расхода и температуры воды в конденсаторе. Мощность электронагревателя зависит от силы протекающего через него тока и регулируется реостатом; производительность конденсатора регулируется количеством охлаждающей воды.

4. Выполнение работы

Приступая к выполнению работы, необходимо:

– ознакомиться с устройством и работой опытной установки (см. рис. 3);

– ознакомиться с применяемыми в работе измерительными приборами и записать их характеристики в таблицу (см. прил. 1);

– выписать данные градуировки термомпары из градуировочной таблицы, имеющейся в лаборатории.

Все измерения заносятся в протокол наблюдений (см. табл. 1).

Для установления зависимости между давлением и температурой пара с наибольшей точностью желательно было бы произвести измерение этих параметров при нескольких различных режимах кипения, каждый из которых являлся бы стационарным. Однако выполнение такого опыта потребовало бы весьма значительного времени. Поэтому в данной работе измерение давления и температуры пара производится при не вполне стационарных условиях, т. е. при медленном повышении или понижении этих параметров.

Измерения следует проводить с интервалом 0,02–0,06 МПа, всего в опыте должно быть не менее пяти–шести измерений.

ПОВЫШЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВЫШЕ 0,3 МПа НЕДОПУСТИМО. В случае перехода стрелки манометра за красную черту (3 кгс/см²) необходимо немедленно выключить ток и увеличить поступление воды в конденсатор.

Если в момент начала работы давление в установке достигнет максимально допустимого значения, следует работать «на понижение», т. е. увеличить приток воды в конденсатор или уменьшить силу тока в электронагревателе таким образом, чтобы давление начало медленно снижаться, и вести измерения в направлении понижения давления с теми же интервалами, какие рекомендованы выше, при работе «на повышение».

Для получения данных зависимости $p = f(T_n)$ с удовлетворительной точностью в условиях нестационарного процесса кипения весьма важно производить измерения давления и температуры **ОДНОВРЕМЕННО**. Измерение давления при положении стрелки манометра между двумя делениями шкалы также связано с определенной погрешностью отсчета. Поэтому измерения производятся следующим образом: при приближении стрелки манометра к очередному делению шкалы заранее записывают значение данного деления; затем, также заранее, нажимают кнопку включения термомпары и при достижении стрелкой манометра линии деления быстро делают отсчет показания цифрового милливольтметра.

Для определения абсолютного давления пара необходимо знать атмосферное давление; так как оно изменяется относительно медленно, его достаточно измерить один раз, в начале опыта. Измерение производится при помощи барометра.

5. Обработка результатов опыта

По окончании измерений полученные данные обрабатывают таким образом, чтобы наглядно выявить зависимость $p = f(T_n)$ и сравнить данную опытную зависимость с точными справочными данными, установленными рядом теоретических и экспериментальных научно-исследовательских работ.

Для каждого из состояний пара, при которых производились измерения, рассчитывают абсолютное давление и температуру пара. При расчете температуры интерполирование рекомендуется производить графическим способом, для чего на основании градуировочной таблицы предварительно строят график $t = f(E)$.

Ход обработки и ее результаты систематизируются в таблице.

Далее на миллиметровой бумаге строят КРУПНОМАСШТАБНЫЙ график $p-T_n$, на который наносят опытные точки и осредненную кривую. На том же графике строят вторую кривую по выписанным из таблиц [1] справочным данным для интервала температур от 90 до 150 °С (с шагом 5 или 10 °С). Точку изображают пересечением вертикального и горизонтального штрихов, соответствующих табличным значениям температуры и давления. Через середины пересечений по согнутой линейке проводят кривую. С помощью данной кривой определяют точные значения температур насыщения для всех опытных давлений и включают их в представленную ниже таблицу (табл. 3). Определяют расхождения ΔT между опытными и точными данными справочных значений температур.

Таблица 3

Результаты обработки опытных данных

Номер измерения	$p_{\text{изб}}$ (по манометру), МПа	$p_{\text{абс}}$, МПа	t , °С	T , К	$T_{\text{табл}}$, К	$p_{\text{табл}}$, МПа	ΔT , К	$\delta_T =$ $= \Delta T / T_{\text{табл}}$
1								
2								
3								
...								

Для четырех–пяти опытных значений температуры вычисляют относительную ошибку определения температуры (в процентах) по формуле

$$\sigma_T = (\Delta T / T_{\text{табл}}) 100.$$

Затем вычисляют среднее арифметическое отклонение. Опытные данные считаются удовлетворительными, если оно не превышает 3 %.

На основании проведенного расчетного анализа необходимо сделать краткие выводы о характере изучаемой зависимости, качестве полученных опытных данных и возможных причинах их отклонения в том или другом направлении от имеющихся табличных данных.

6. Отчет о работе

По окончании работы составляют отчет, который должен содержать:

- схему опытной установки с краткой спецификацией основных ее элементов;
- характеристику приборов;
- данные градуировки термопар и график $t = f(E)$;
- протокол наблюдений;
- результаты обработки опытных данных;
- совмещенный график зависимости $p = f(T_n)$ по данным, полученным из опыта, и литературным данным (на миллиметровой бумаге с указанием масштабов по осям координат);
- значение σ_T и расчеты, связанные с его определением;
- анализ опытных данных и выводы по результатам работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНТАЛЬПИИ ВОДЯНОГО ПАРА МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО ДРОССЕЛИРОВАНИЯ

1. Задание

1. Составить четкое представление об энтальпии как функции состояния, уяснить физический смысл этого параметра, способы определения энтальпии пара по таблицам, диаграммам и расчетом.

2. Провести эксперимент по определению энтальпии перегретого водяного пара. Сравнить полученное значение энтальпии и интегрального дроссель-эффекта с данными таблиц свойств водяного пара.

2. Основные теоретические понятия

Энтальпией, или теплосодержанием называется функция состояния, представляющая собой сумму внутренней энергии и потенциальной энергии давления

$$h = u + pv.$$

Указанный параметр можно представить так же, как количество теплоты, необходимое для нагревания единицы массы вещества от состояния, принятого за начальное, до данного состояния в процессе постоянного давления

$$\Delta h = c_{pm} \Delta t.$$

Энтальпия – важный параметр, дающий возможность просто и точно определить количество теплоты, участвующей в процессе парообразования, конденсации и других изобарных процессах.

Рассматриваемый параметр является одной из важнейших calorических величин, необходимых для расчета любого энергетического или холодильного оборудования: котлов, турбин, компрессоров, различных теплообменников и т. п.

Энтальпия вещества может быть определена различными способами. В лабораторной работе производится определение энтальпии водяного пара с помощью адиабатического дросселирования. Идея заключается в определении энтальпии пара h_1 по равному ей значению энтальпии после дросселирования h_2 . Применение данного способа позволяет получить наиболее точные результаты.

Под дросселированием, или мятием, понимается понижение давления пара или газа при прохождении рабочего тела через участок с местным сопротивлением. При этом обычно уменьшается и температура пара, увеличивается его объем, но расширение не сопровождается совершением полезной работы. Процесс дросселирования является типичным необратимым процессом и сопровождается увеличением энтропии.

Из уравнения первого закона термодинамики для случая адиабатического дросселирования может быть получено равенство $h_1 = h_2$, показывающее, что энтальпия пара после дросселирования равна его начальной энтальпии.

3. Лабораторная установка

Устройство установки показано на рис. 5. Установка работает на водяном паре, поступающем из парогенератора 1. Постоянное давление пара, подаваемого в установку, обеспечивается с помощью контактного манометра. Перегрев пара осуществляется в электрическом пароперегревателе 2, откуда пар поступает в первую измерительную камеру 3.

В первой камере с помощью образцового манометра измеряется давление p_1 , а с помощью медьконстантановой термопары 4 – температура t_1 . Энтальпия пара в первой измерительной камере подлежит определению. Из первой камеры пар поступает в вентиль 5, где и происходит его дросселирование до давления, близкого к атмосферному. После вентиля пар проходит во вторую измерительную камеру 6, где измеряются его параметры после дросселирования: давление p_2 – образцовым манометром и температура t_2 – термопарой 7. Измерение ЭДС в цепи термопар 4 и 7 производится с помощью цифрового милливольтметра, который переключателем может быть включен в цепь той или другой термопары.

Из второй измерительной камеры пар поступает в конденсатор-калориметр 8, где охлаждается и конденсируется. Образовавшийся конденсат сливается в мерный сосуд 10. Температура конденсата на выходе t_k измеряется с помощью термопары 9. Теплота, отдаваемая паром при охлаждении и конденсации, воспринимается проточной водопроводной водой. Ее расход может быть определен с помощью мерного бака 13, снабженного водомерным стеклом 14. Шкала водомерного стекла отградуирована в литрах.

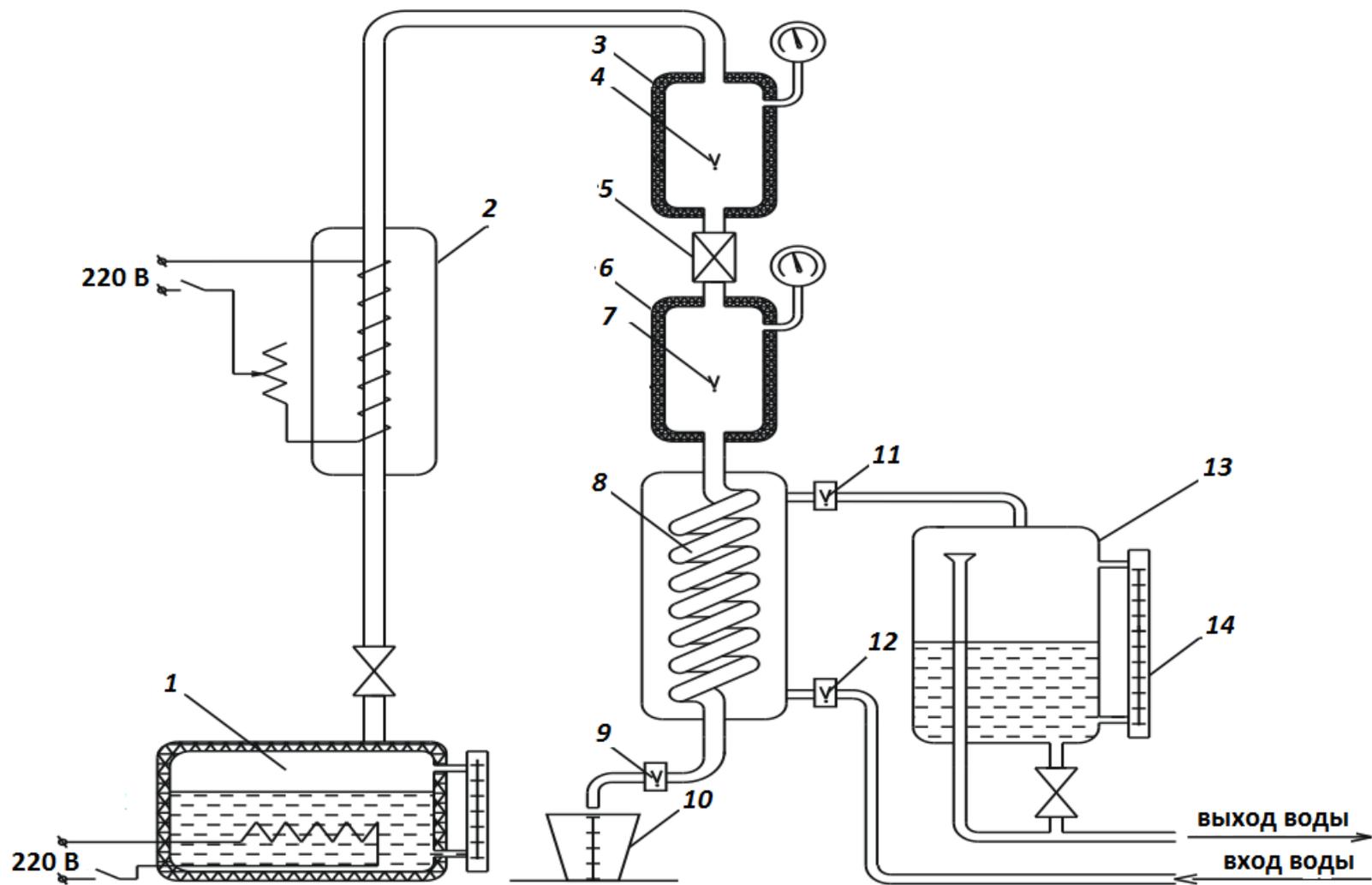


Рис. 5. Лабораторная установка:

1 – парогенератор; 2 – пароперегреватель; 3, 6 – измерительные камеры; 4, 7, 9, 11, 12 – термопары; 5 – вентиль; 8 – конденсатор-калориметр; 10 – мерный сосуд; 13 – мерный бак; 14 – водомерное стекло

Температура воды на входе и выходе из конденсатора-калориметра измеряется с помощью термомпар 12 и 11. Все элементы установки, по которым проходит пар, для уменьшения тепловых потерь расположены возможно ближе друг к другу и защищены изоляцией. Достаточно большая скорость пара в дроссельном устройстве также способствует адиабатичности процесса.

4. Выполнение работы

Парогенератор включается лаборантом до начала работы и все происходящие в установке процессы своевременно приобретают стационарный характер.

Перед началом измерений необходимо внимательно ознакомиться с устройством установки и произвести предварительные (без записи в таблицу) измерения давлений p_1 и p_2 , температур пара t_1 и t_2 , конденсата t_k и охлаждающей воды на входе и выходе $t_{вх}$ и $t_{вых}$.

Избыточное давление пара в первой измерительной камере устанавливается в пределах 0,2–0,3 МПа, температура – 150–200 °С.

После ознакомления с установкой производят измерения величин, необходимых для вычисления энтальпии.

Для измерения количества получаемого конденсата и расхода охлаждающей воды подставляют под слив конденсата пустой мерный сосуд и одновременно переключают трехходовой кран для подачи охлаждающей воды в мерный бак 13. В этот же момент записывают время, соответствующее началу сбора конденсата и охлаждающей воды. Сбор рекомендуется проводить 10–15 мин. По истечении намеченного времени необходимо убрать мерный сосуд из-под слива конденсата и одновременно переключить кран на подачу охлаждающей воды в сливную воронку. Имея данные о собранном количестве конденсата и воды в выбранном интервале времени, рассчитывают расход конденсата и воды.

В течение опыта необходимо произвести не менее пяти измерений величин p_1 , p_2 , t_1 , t_2 , t_k , $t_{вх}$, $t_{вых}$, занося результаты измерений в протокол наблюдений (табл. 4).

Протокол наблюдений

Атмосферное давление $B =$ мм рт. ст.

Время проведения опыта	Объем охлаждающей воды в баке, л	Объем собранного конденсата, л	Номер измерения	Показания манометра, дел. (или кгс/см ²)		ЭДС термопар, мВ				
						Измерительные камеры		Охлаждающая вода		Конденсат
				p_1	p_2	t_1	t_2	$t_{вх}$	$t_{вых}$	t_k
Начало опыта			1							
			2							
			3							
Конец опыта			4							
			5							
			Среднее за опыт							

5. Обработка результатов опыта

Определяют объемные расходы конденсата и охлаждающей воды как разности конечного и начального отсчетов по водомерному стеклу. Подсчитывают абсолютное давление по показаниям манометра и барометра. Значения температур t_1 и t_2 , отсчитанные по шкале цифрового милливольтметра (в милливольтках), переводят в градусы Цельсия с помощью таблиц градуировки, имеющих в лаборатории.

Так как в ходе опыта возможны небольшие колебания температуры охлаждающей воды, пара и конденсата, а также колебания давления из-за включения и выключения электронагревателя в парогенераторе, в качестве расчетных значений всех этих величин принимают среднее по данным пяти измерений.

Для нахождения энтальпии h_1 воспользуемся упомянутым выше соотношением $h_1 = h_2$ и определим расчетом величину h_2 , равную интересующей нас величине h_1 .

Процесс отвода теплоты от пара в конденсаторе-калориметре – изобарный и отведенная теплота может быть выражена через разность энтальпий

$$q = h_2 - h_k,$$

где h_2 – энтальпия пара на входе в конденсатор-калориметр, равная энтальпии во второй измерительной камере, кДж/кг; h_k – энтальпия конденсата на выходе из конденсатора-калориметра, кДж/кг; q – удельное количество теплоты, отведенной от пара, кДж/кг.

Величина q может быть найдена по данным о нагревании охлаждающей воды, ее массовом расходе и массовом расходе конденсата:

$$q = \frac{M_B c_{pm} (t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}})}{M_K}.$$

Энтальпия h_k конденсата может быть рассчитана по формуле

$$h_k = c_{pm} t_k,$$

где c_{pm} – удельная теплоемкость воды, равная 4,19 кДж/(кг·К).

Таким образом,

$$h_1 = h_2 = q + h_k.$$

Значения энтальпий h_1 и h_2 необходимо также определить по таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара [1] или из диаграммы (прил. 4), зная t_1 и p_1 в первой камере и t_2 и p_2 во второй камере.

По окончании расчета необходимо изобразить на диаграмме T – s все процессы, происходящие на установке, показать точки, соответствующие состоянию пара до и после дросселирования, и провести ориентировочную линию процесса адиабатного дросселирования.

Необходимо иметь в виду, что определение энтальпии перегретого пара можно было бы осуществить и не подвергая пар дросселированию. В этом случае пар из первой измерительной камеры поступал бы непосредственно в конденсатор. При этом расход пара был бы очень велик, следовательно, и теплообменную поверхность конденсатора нужно было бы значительно увеличить.

Для сопоставления опытного значения интегрального эффекта Джоуля–Томсона $\Delta t = t_2 - t_1$ со значением эффекта, найденного по диаграмме h – s для воды и водяного пара, необходимо выполнить следующее построение. По параметрам пара в первой камере (p_1 и t_1) находят по диаграмме точку I , через которую проводят линию $h = \text{const}$

до пересечения с изобарой p_2 в точке 2. Затем определяют t_2 и величину эффекта $\Delta t = t_2 - t_1$. Поскольку точность такого построения небольшая, интегральный дроссель-эффект также следует рассчитывать, используя интерполяцию табличных данных по термодинамическим свойствам перегретого водяного пара [1].

6. Отчет о работе

Отчет о работе должен содержать:

- принципиальную схему установки;
- протокол наблюдения;
- расчеты, связанные с определением h_1 ;
- табличное значение энтальпии (определенное по p_1 и t_1 и p_2 и t_2) и расчет отклонений опытных данных от табличных;
- опытное значение интегрального эффекта Джоуля–Томпсона и его сравнение с расчетными значениями эффекта;
- диаграмму T – s для водяного пара с изображением всех процессов, происходящих на установке, включая процесс дросселирования;
- анализ опытных данных и выводы по результатам работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ СУХОСТИ ВЛАЖНОГО НАСЫЩЕННОГО ПАРА

1. Задание

1. Составить четкое представление о каждом из состояний вещества (ненасыщенная и насыщенная жидкость; влажный, сухой насыщенный и перегретый пар; критическое состояние). Уяснить сущность и взаимосвязь основных величин, характеризующих процесс кипения: температуры насыщения, давления насыщения, удельной теплоты парообразования, степени сухости влажного пара.

2. Определить опытным путем степень сухости водяного пара при некотором заданном режиме парообразования (давление, тепловая нагрузка) в котле экспериментальной установки.

2. Основные теоретические понятия

Паром называется реальный газ, близкий к состоянию насыщения, т. е. к превращению в жидкость.

Насыщенным называется пар, находящийся в равновесии с кипящей жидкостью, из которой он образуется. Температура кипящей жидкости и находящегося над ней пара называется температурой насыщения; она является однозначной функцией давления, при котором происходит процесс кипения (давления насыщения). Зависимость $T_n = f(p)$ имеет сложный характер. При повышении давления температура насыщения возрастает. Насыщенный пар может быть сухим и влажным.

Влажный насыщенный пар получают при неполном испарении жидкости: он является смесью сухого насыщенного пара с мельчайшими взвешенными в нем капельками насыщенной жидкости.

Степенью сухости влажного пара x называется массовая доля сухого насыщенного пара в общей массе влажного пара.

Количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг насыщенной жидкости в сухой насыщенный пар того же давления, называется удельной теплотой парообразования.

Состояние влажного пара определяется двумя параметрами: давлением (или температурой) и степенью сухости. Так как при одном давлении и соответствующей температуре насыщения возможно

бесчисленное множество состояний влажного пара, отличающихся по степени сухости, то таблицы влажного пара не составляются и его параметры определяются расчетом.

Так, например, энтальпия влажного пара может быть найдена по формуле

$$h_x = h' + rx,$$

где h' – энтальпия насыщенной жидкости при том же давлении, Дж/кг; r – удельная теплота парообразования при данном давлении, Дж/кг; x – степень сухости влажного пара.

Произведение rx показывает, какое количество теплоты должно быть подведено к 1 кг насыщенной жидкости, чтобы превратить в пар часть жидкости, равную x . Иначе, rx представляет собой приращение энтальпии вещества в процессе перехода из состояния насыщенной жидкости в состояние влажного пара со степенью сухости x в процессе постоянного давления.

3. Лабораторная установка

Схема установки представлена на рис. 6. Образовавшийся в электрическом парогенераторе 1 водяной пар поступает в пароперегреватель 3. Несмотря на наличие в парогенераторе приспособления для осушки, входящий в пароперегреватель пар имеет степень сухости x меньше единицы, т. е. является влажным. Пароперегреватель представляет собой трубку, внутри которой движется пар, а снаружи расположен электрический нагреватель. Для уменьшения теплопотерь электроспираль изолирована. Все устройство помещено в жестяной кожух.

Благодаря подводу теплоты от нагревателя влажный пар превращается сначала в сухой, а затем – в перегретый пар и через вентиль 4 поступает в конденсатор 5. Конденсатор сделан в виде трубчатого змеевика, расположенного в кожухе. Внутри змеевика движется пар, снаружи – охлаждающая вода. Вода отнимает теплоту от пара (температура воды ниже температуры пара), благодаря чему он конденсируется. Конденсат собирается в мерный сосуд 6.

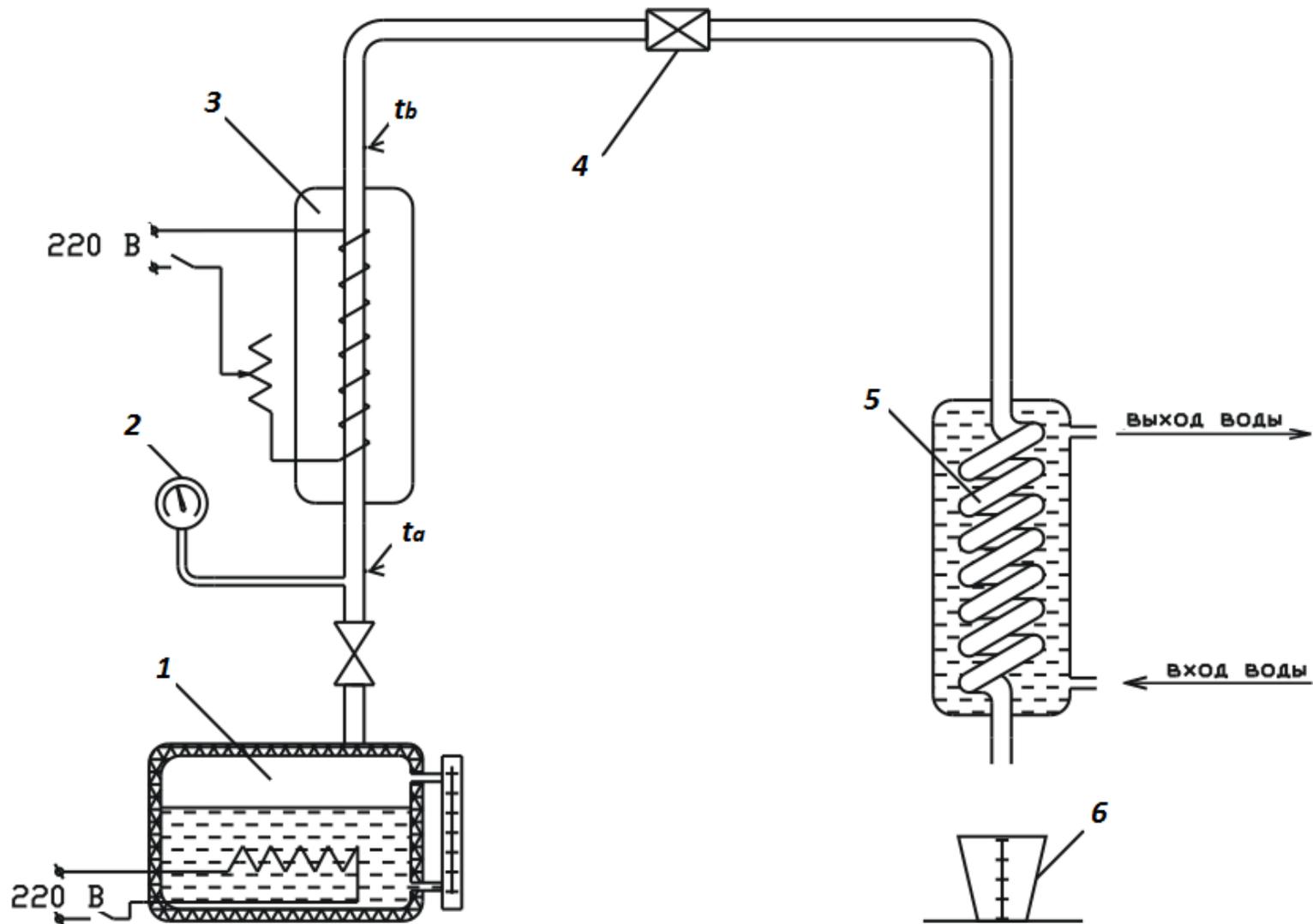


Рис. 6. Схема лабораторной установки:
 1 – парогенератор; 2 – манометр; 3 – пароперегреватель; 4 – вентиль; 5 – конденсатор; 6 – мерный сосуд

В цепь электронагревателя, установленного на пароперегревателе, включены ваттметр для измерения и реостат для регулирования мощности.

Состояние пара, входящего в пароперегреватель, обозначим буквой « a », а выходящего – буквой « b ».

Для измерения температуры пара, входящего в пароперегреватель и выходящего из него, установлены термопары t_a и t_b . Они подключены к переключателю, через который могут быть соединены с цифровым милливольтметром. Холодные спаи термопар опущены в сосуд Дьюара, где поддерживается температура $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для измерения давления в парогенераторе и пароперегревателе установлен манометр 2.

4. Выполнение работы

Приступая к выполнению работы, необходимо:

- ознакомиться с устройством и работой опытной установки;
- ознакомиться с применяемыми в работе измерительными приборами и записать их характеристики по форме, данной в прил. 1;
- записать данные градуировки термопар по градуировочной таблице, имеющейся на установке, в пределах колебания ЭДС в опыте (по форме прил. 2);
- подготовить для записи замеров протокол наблюдений по форме, приведенной ниже (табл. 5).

Таблица 5

Протокол наблюдений

Атмосферное давление $B =$ мм рт. ст.

Номер измерения	Показание манометра, кгс/см ²	Q_w , Вт	ЭДС термопар, мВ		M , кг	τ , мин
			t_a	t_b		
1						
2						
3						
Среднее за опыт						

При проведении опыта измеряют следующие величины: давление пара $p_{\text{изб}}$ – манометром, атмосферное давление B – барометром, температура t_b – термометром, мощность грелки Q_w – ваттметром и продолжительность опыта τ . Температура t_a может быть измерена термометром, а также найдена по таблицам паров на основании показаний манометра [1].

При установившемся режиме массовый расход пара, проходящего в секунду через пароперегреватель, равен секундному расходу образовавшегося конденсата. Массовый расход конденсата M может быть определен с помощью мерного сосуда b , причем может быть измерено количество жидкости, полученной за какой-то отрезок времени, например 15–20 мин, и расчетом найден расход M (кг/с).

5. Обработка результатов опыта

Обработку опытных данных производят в следующем порядке.

Определяют абсолютное давление $p_{\text{абс}} = p_{\text{изб}} + B$. По графику или таблице градуировки определяют температуру t_b по среднему значению ЭДС термометра.

Температуру t_a также определяют по среднему значению ЭДС соответствующей термометра. Для контроля данную температуру находят и по таблицам насыщенных паров [1] по величине давления $p_{\text{абс}}$.

Степень сухости пара, поступающего в пароперегреватель, может быть определена следующим образом. Энтальпия пара в точке « b »

$$h_b = h_a + q,$$

где h_a – энтальпия пара в точке « a », кДж/кг; q – количество теплоты, подведенной к 1 кг пара, проходящего через пароперегреватель, кДж/кг.

Энтальпия h_b может быть определена по температуре t_b и давлению в точке « b » с помощью таблиц для перегретых паров либо – менее точно – с помощью диаграмм $T-s$ или $h-s$ водяного пара.

Удельная теплота q может быть найдена по уравнению

$$q = Q/M.$$

В свою очередь,

$$Q = Q_w - Q_m,$$

где Q_w – тепловой поток, подводимый электронагревателем, кВт;
 Q_m – тепловой поток, отдаваемый поверхностью пароперегревателя
в воздух (теплопотери), кВт.

Теплопотери в основном зависят от температуры поверхности пароперегревателя и определяются в зависимости от измеренной температуры t_b из таблицы вида $Q_m/Q_w = f(t_b)$, имеющейся на установке.

По известным h_b и q определяется h_a . С другой стороны, энтальпия влажного пара

$$h_a = h_a' + r_a x_a,$$

где h_a' – энтальпия насыщенной жидкости при температуре t_a , кДж/кг;
 r_a – удельная теплота парообразования при t_a , кДж/кг.

Величины h_a' и r_a находят по таблицам насыщенных паров или по диаграммам $T-s$ и $h-s$ при температуре входящего пара t_a .

Таким образом, известны все величины, кроме x_a , следовательно,

$$x_a = (h_a - h_a') / r_a.$$

Итоги расчетов оформляют в виде таблицы по форме, приведенной ниже (табл. 6).

Таблица 6

Результаты обработки опытных данных

Номер опыта	p , МПа	t_b , °С	Q_w , Вт	Q_m , Вт	Q , Вт	M , кг/с	q , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	h_b , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	t_a , °С	h_a , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	r_a , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	x_a
1												

6. Отчет о работе

По окончании работы составляют отчет, в котором приводят:

- схему установки;
- характеристику применяемых в работе измерительных приборов;
- протокол наблюдений;
- таблицу и график градуировки термопар;
- результаты обработки опытных данных и таблицу расчетных данных;
- изображение всех процессов, происходящих на установке в $T-s$ и $h-s$ диаграммах.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ХЛАДАГЕНТОВ

1. Задание

1. Составить четкое представление о каждом из состояний вещества (ненасыщенная и насыщенная жидкость; влажный, сухой насыщенный и перегретый пар; критическое состояние). Уяснить физический смысл величин, характеризующих процесс кипения: температуры насыщения, давления насыщения, теплоты парообразования, степени сухости влажного пара. Понять взаимосвязь между ними.

2. Определить опытным путем теплоту парообразования хладагента R318 при одной температуре. Сравнить полученное значение теплоты парообразования с табличными данными и определить погрешность.

2. Основные теоретические понятия

Сухой насыщенный пар – это реальный газ, близкий к состоянию насыщения, т. е. к превращению в жидкость.

Насыщенным называется пар, находящийся в равновесии с кипящей жидкостью, из которой он образуется. Температура кипящей жидкости и находящегося над ней пара называется температурой насыщения, она является однозначной функцией давления, при котором происходит процесс кипения (давление насыщения). Эта зависимость имеет сложный характер. При повышении давления температура насыщения возрастает. Насыщенный пар может быть сухим или влажным.

Сухой насыщенный пар получается при полном испарении всей жидкости, т. е. представляет собой пар, не содержащий жидкой фазы и имеющий температуру насыщения.

Влажный насыщенный пар получается при неполном испарении жидкости и является смесью сухого насыщенного пара и насыщенной жидкости.

Степенью сухости влажного пара x называется массовая доля сухого насыщенного пара в общей массе влажного пара.

Количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг насыщенной жидкости в сухой насыщенный пар при постоянном давлении, называется удельной теплотой парообразования.

Теплоту парообразования можно разделить на две составляющие: внутреннюю и внешнюю теплоту парообразования. Первая представляет собой теплоту, расходуемую на изменение агрегатного состояния вещества, равную разности внутренних энергий насыщенного пара и насыщенной жидкости $\gamma_{\text{вн}} = u'' - u'$; вторая – теплоту, расходуемую на совершение работы расширения, связанной с изменением объема вещества при превращении насыщенной жидкости в сухой насыщенный пар при постоянном давлении

$$\psi = p (v'' - v')$$

Итак,

$$r = \gamma_{\text{вн}} + \psi.$$

Для всех жидкостей значение r зависит от температуры или соответствующего ей давления насыщения. По мере повышения r уменьшается и достигает нулевого значения в критической точке, где $\gamma_{\text{вн}} = 0$ и $\psi = 0$.

Теплота парообразования зависит от молекулярной массы вещества. Для высокомолекулярных жидкостей ее значения малы.

Значения удельной теплоты парообразования при температуре 0 °С весьма различны для разных жидкостей, кДж/кг:

Вода	2501,0
Аммиак	1261,5
R12	152,1
R22	204,4

Удельная теплота парообразования является одной из важнейших характеристик хладагентов, так как в значительной степени определяет удельную холодопроизводительность циклов.

Аналитически теплота парообразования может быть найдена по уравнению Клапейрона–Клаузиуса

$$r = T(v'' - v') \frac{dp}{dT_{\text{н}}},$$

где v'' и v' – удельные объемы хладагента в состоянии сухого насыщенного пара и насыщенной жидкости, а производная dp/dT_n характеризует темп роста давления насыщения при увеличении температуры.

Экспериментально величину r можно определить путем прямых калориметрических измерений.

3. Лабораторная установка

Устройство лабораторной установки показано на рис. 7. Основными ее элементами являются хладоновый парогенератор 8 и конденсатор 7, которые соединены трубками с вентилями 6 и 9.

Парогенератор и конденсатор вместе с соединительными магистралями помещены в термостат 5, в котором организована принудительная циркуляция воздуха с помощью вентилятора 1. Для стабилизации температуры воздуха используется малоинерционный нагреватель 2, включением и выключением которого управляет контактный термометр 4.

Парогенератор представляет собой тонкостенный стальной сосуд. В нижнюю его часть вмонтирован электрический нагреватель 11, обеспечивающий подвод теплоты к кипящему хладагенту. В верхней части парогенератора установлен лабиринтный отделитель капель пара, препятствующий их уносу в магистраль. Температуру жидкого кипящего хладагента и его пара определяют с помощью термопар, горячие спаи которых введены внутрь парогенератора. Давление хладагента измеряют манометром 10, стрелка которого не должна заходить за красную черту на шкале прибора, соответствующую максимально допустимому уровню давления.

При открытом вентиле 6 пар из парогенератора поступает в конденсатор. В верхней части конденсатора расположен змеевик 3, по которому циркулирует вода из жидкостного термостата. Температура воды в термостате поддерживается на 2–4 °С ниже температуры хладагента в парогенераторе. Соответственно и давление пара хладагента в конденсаторе ниже, чем давление в парогенераторе, что заставляет пар устремиться из парогенератора в конденсатор. Здесь пар конденсируется на наружной поверхности змеевика, стекает и собирается в нижней части сосуда, так как вентиль 9 закрыт. Уровень конденсата и его объем могут быть установлены с помощью специальной шкалы. Вентиль 9 открывают для перепуска (переливания)

жидкого хладагента из конденсатора в парогенератор. Данную процедуру после окончания серии опытов выполняет лаборант.

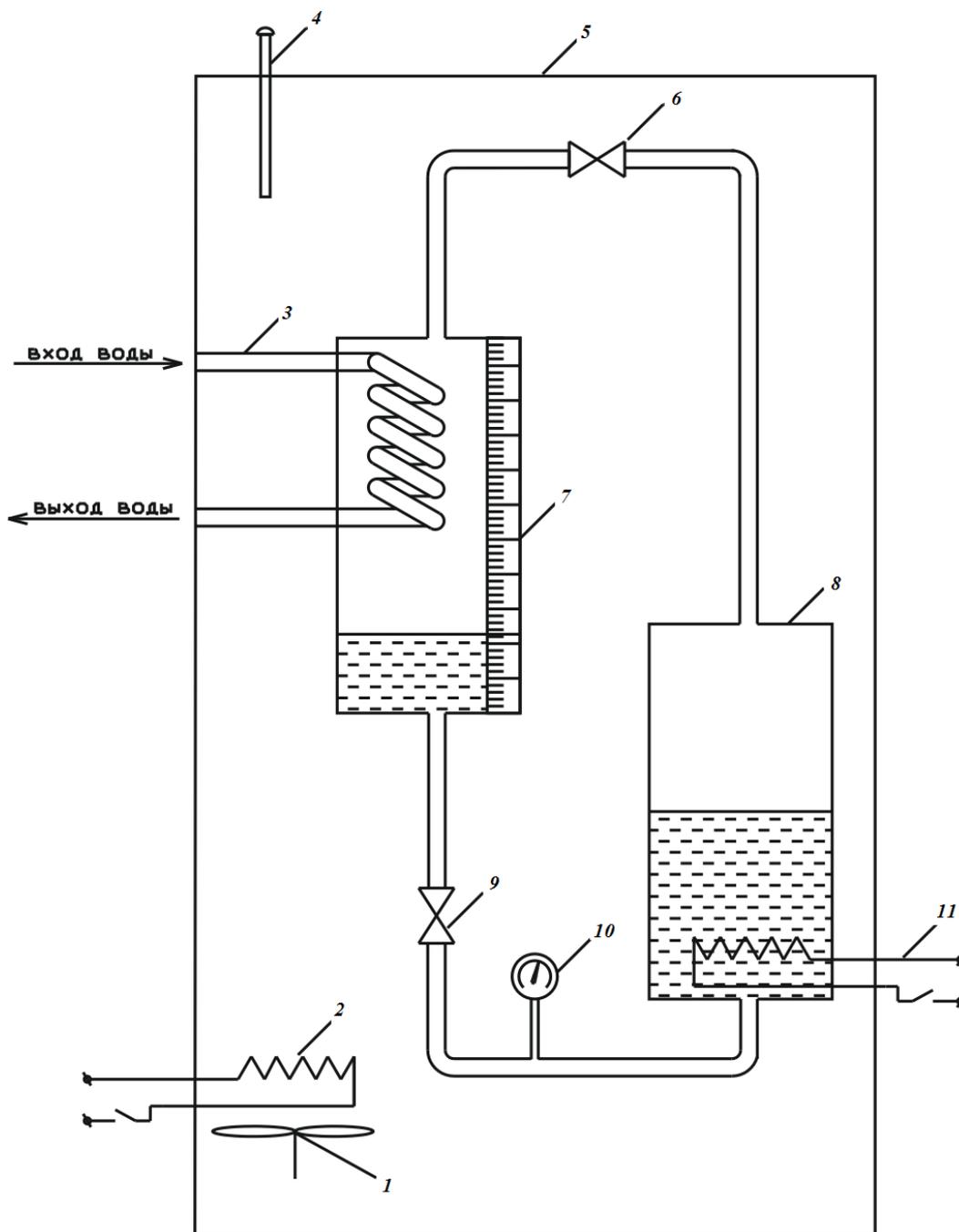


Рис. 7. Схема лабораторной установки:
1 – вентилятор; 2 – малоинерционный нагреватель; 3 – змеевик;
4 – термометр; 5 – термостат; 6, 9 – вентили; 7 – конденсатор;
8 – парогенератор; 10 – манометр; 11 – электрический нагреватель

Следует подчеркнуть, что получение правильных результатов возможно, если теплота, выделяемая нагревателем парогенератора, будет практически полностью расходоваться на процесс парообразования хладагента, а теплообмен термостата с воздухом очень мал. Поэтому температура воздуха в термостате должна быть весьма близкой к температуре кипения хладагента.

4. Выполнение работы

Воздушный и жидкостный термостаты включаются лаборантом заранее для того, чтобы к началу измерений температуры различных элементов установки стабилизировались. Прежде чем начать опыт, необходимо: тщательно ознакомиться с устройством установки; проверить наличие тока в цепи нагревателя парогенератора (по показанию амперметра); проверить работу воздушного и жидкостного термостатов. При правильной работе нагревательные элементы обоих термостатов периодически включаются и выключаются, что легко контролируется по сигнальным лампочкам. Процесс конденсации хладагента можно наблюдать через прозрачную часть корпуса конденсатора. Если более половины объема конденсатора заполнено жидким хладагентом и оставшегося свободного пространства недостаточно для проведения опыта, то необходимо с помощью лаборанта перепустить жидкий хладагент в парогенератор.

Убедившись в правильности работы элементов установки, приступают к проведению опыта. Для этого фиксируют время начала эксперимента и уровень жидкого хладагента в конденсаторе. Обычно продолжительность опыта составляет 20–30 мин. В течение этого времени необходимо не менее пяти раз произвести измерения мощности нагревателя парогенератора и температуры кипящего хладагента. Для получения удовлетворительных результатов нужна высокая стабильность температуры пара хладагента, так как удельная теплота парообразования существенно зависит от температуры насыщения. В конце измерения вторично фиксируют время и определяют новый уровень конденсата.

Результаты измерений записывают в протокол наблюдений по форме, представленной ниже (табл. 7).

Протокол наблюдений

Объем жидкого хладагента, см ³		Номер измерения	ЭДС термопар, мВ			Мощность нагревателя, Вт	Избыточное давление в парогенераторе, кгс/см ²
Начало опыта	Конец опыта		Паровое пространство	Кипящая жидкость	Конденсатор		
		1					
Продолжительность парообразования, мин		2					
		3					
		4					
		5					
		Среднее за опыт					

5. Обработка результатов опыта

Так как в ходе опыта возможны небольшие колебания температуры парообразования хладагента и мощности нагревателя парогенератора, в качестве расчетных берут осредненные величины по данным пяти измерений. Для определения температур следует использовать имеющуюся в лаборатории таблицу градуировки термопар.

Удельную теплоту парообразования r , Дж/кг, вычисляют по формуле

$$r = Q_w \tau / M,$$

где Q_w – средняя мощность нагревателя, Вт; τ – продолжительность процесса парообразования, с; M – масса сконденсировавшегося за это время хладагента, кг.

Масса хладагента может быть найдена по его объему и плотности. Плотность жидкого хладагента определяют по таблицам термодинамических свойств по измеренному значению температуры насыщения в конденсаторе.

Экспериментальное значение удельной теплоты парообразования сравнивают с табличным и определяют относительную погрешность опыта.

Табличное значение теплоты парообразования находят интерполяцией табличных данных на среднее (в течение опыта) значение температуры в паровом пространстве парогенератора.

По барометрическому давлению и осредненному показанию манометра вычисляют абсолютное давление хладагента в парогенераторе, которое сравнивают с табличным для измеренной температуры насыщения. Расхождение между этими показателями в пределах 2–3 % свидетельствует об удовлетворительном режиме работы установки.

6. Отчет о работе

Отчет о работе должен содержать:

- схему установки;
- протокол наблюдений;
- расчеты, связанные с определением значения r ;
- табличное значение теплоты парообразования и расчет погрешности;
- диаграмму $T-s$ с нанесением процесса парообразования хладагента;
- анализ опытных данных и выводы по результатам работы.

На диаграмме должны быть показаны линии $h = \text{const}$, соответствующие состоянию сухого насыщенного пара хладагента и его насыщенной жидкости, а также значение r (не в масштабе).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АДИАБАТНОГО ИСТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ СУЖИВАЮЩЕЕСЯ СОПЛО

1. Задание

1. Составить представление о назначении и месте процессов истечения в энергетических установках. Понять, как меняются параметры газа (пара) при прохождении через сопло, каково максимальное значение скорости газа на выходе из цилиндрического или суживающегося сопла. Рассмотреть формулы для определения скорости и массового расхода газа при адиабатном истечении.

2. Определить опытным путем массовый расход воздуха при адиабатном истечении через суживающееся сопло. Для различных значений $\beta = p_2/p_1$. Построить график зависимости $w_2 = f(\beta)$. Сравнить полученные опытные данные с расчетными.

2. Основные теоретические понятия

Каналы, в которых происходит расширение газа ($dp < 0$) и увеличение его скорости ($dw > 0$), называются соплами или насадками. Поскольку понижение давления газа или пара в процессе истечения связано с получением располагаемой работы, сопла различной конфигурации нашли в современной технике широкое применение в разного рода турбинах и реактивных двигателях.

Рабочее тело расширяется в насадке; его скорость, а следовательно, и кинетическая энергия значительно увеличиваются. Струя газа (пара), вытекающая из сопла, направляется на лопатки колеса турбины, где, изменяя направление своего движения, отдает им часть своей кинетической энергии и приводит колесо в движение. Скорость, с которой рабочее тело вытекает из сопла, составляет обычно несколько сотен метров в секунду. При такой скорости истечение газа или пара происходит столь быстро, что рабочее тело не успевает ни получать от окружающей среды, ни отдавать ей теплоту, поэтому принято считать такой процесс истечения адиабатным.

Для определения скорости истечения идеального газа из сопла используют формулу

$$w_2 = \sqrt{2kp_1v_1 / k - 1 \left[1 - p_2 / p_1^{k-1/k} \right]}, \quad (1)$$

где k – показатель адиабаты; p_1, p_2 – соответственно давление газа на входе в сопло и выходе из него, Па; v_1 – удельный объем газа перед соплом, м³/кг.

Анализируя приведенную формулу для w_2 , можно было бы предположить, что при изменении β от единицы до нуля происходит непрерывное увеличение скорости газа. Однако опытами установлено, что в данном случае скорость газа возрастает лишь до некоторого значения, называемого *критической скоростью* и обозначаемого $w_{2кр}$. Критическая скорость истечения равна *местной скорости звука* в выходном сечении сопла. Давление p_2 на выходе из сопла, при котором расход газа достигает максимума, а скорость – значения $w_{2кр}$, называется критическим. Соответственно отношение давлений $p_{2кр}/p_1$ обозначают через $\beta_{кр}$. Можно показать, что

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

Для двухатомных газов (в том числе и воздуха) $k = 1,4$ и $\beta_{кр} = 0,528$.

Для определения *максимального* значения скорости газа может быть использована формула (1) после подстановки в нее выражения для $\beta_{кр}$. Формула приобретает следующий вид:

$$w_{2кр} = \sqrt{2kp_1v_1 / k + 1}. \quad (2)$$

3. Лабораторная установка

Схема лабораторной установки представлена на рис. 8.

Воздух забирается из помещения компрессором 1, сжимается им до давления 0,3–0,4 МПа (3–4 бар) и подается в ресивер 3. Основное назначение ресивера состоит в том, чтобы сглаживать пульсации давления воздуха, поступающего к соплу. В ресивере, а соответственно, и во всех частях установки до сопла с помощью специального пружинного клапана 2 поддерживается постоянное высокое давление p_1 . Данное давление измеряется с помощью образцового манометра 4. Воздух с давлением p_1 заполняет камеру 5 и через суживающееся сопло 7 истекает в камеру 8, где поддерживается более низкое давление p_2 , измеряемое с помощью образцового манометра 6.

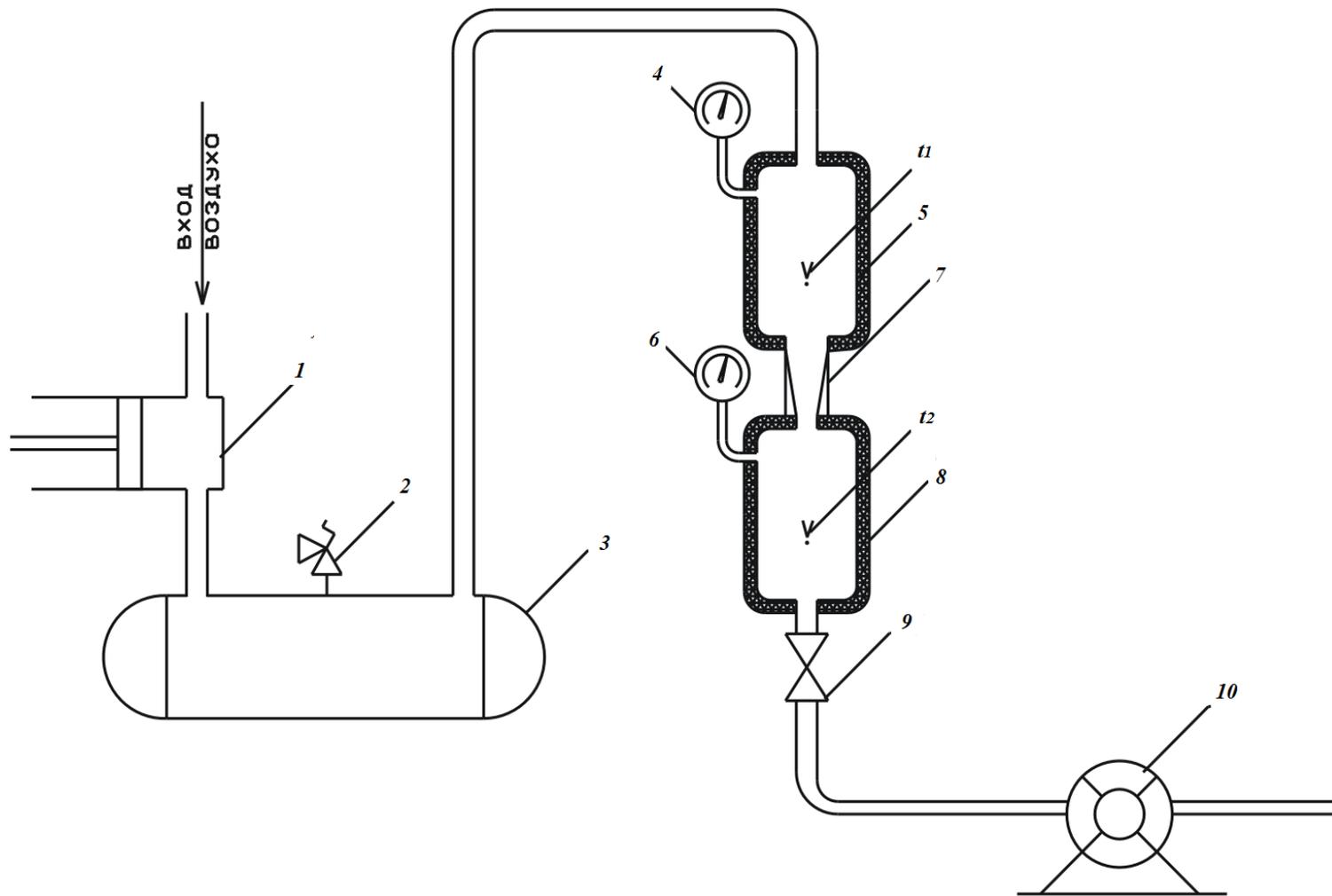


Рис. 8. Схема лабораторной установки:
 1 – компрессор; 2 – пружинный клапан; 3 – ресивер; 4, 6 – манометры;
 5, 8 – камеры; 7 – суживающееся сопло; 9 – вентиль; 10 – счетчик (расходомер)

Давление p_2 в камере 8 может изменяться с помощью вентиля 9. Открывая этот вентиль и облегчая воздуху выход из камеры 8 в помещении, можно понизить давление p_2 , а закрывая – повысить.

Объемный расход воздуха определяется с помощью объемного расходомера 10 или газового счетчика.

4. Выполнение работы

Пуск компрессора осуществляется студентами только в присутствии лаборанта. С помощью клапана устанавливается избыточное давление (измеренное манометром 4) в камере 5 $p_{1изб} = 0,25-0,3$ МПа. В ходе опытов давление p_1 остается неизменным. Отношение давлений $\beta = p_2/p_1$, определяющее скорость и расход при истечении, изменяется за счет изменения давления p_2 в камере 8. Первое значение при самом малом открытии вентиля должно отличаться от значений p_1 приблизительно на 0,05 МПа. Так, например, если в камере 5 установлено давление $p_{1изб} = 0,27$ МПа, то первое значение $p_{2изб}$ должно быть равно приблизительно 0,22 МПа. При таком перепаде давлений, т. е. при $\beta = 0,865$, производят первое измерение объемного расхода воздуха с помощью объемного расходомера, работающего практически при атмосферном давлении.

Результаты измерений заносят в протокол наблюдений (табл. 8).

Таблица 8

Протокол наблюдений

Атмосферное давление $B =$ мм рт. ст.

Номер измерения	p_1 , кг/см ²	p_2 , кг/см ²	ЭДС термопар, мВ		Отрезок времени при измерении τ , с	Показания расходомера v , м ³ /с, или счетчика, м ³
			до сопла	после сопла		
1						
10						

Температуру воздуха T_1 в камере 5 и T_2 в камере 8 измеряют термопарами.

Затем производят аналогичные измерения при других, уменьшающихся значениях p_2 (соответственно и β). Понижение давления p_2 в камере δ перед каждым последующим измерением осуществляется постепенным открытием вентиля. Рекомендуется уменьшать давление p_2 перед каждым последующим измерением на 0,04 МПа. Всего измерений должно быть не менее семи.

По указанию преподавателя опыт может быть повторен при другом значении p_1 .

После окончания опытов необходимо немедленно остановить воздушный компрессор.

5. Обработка результатов опыта

Конечной целью исследования процесса истечения является построение графика зависимости $w_2 = f(\beta)$. Сначала строят теоретическую зависимость. Для этого по формуле (1) рассчитывают скорость воздуха в выходном сечении сопла для круглых значений β , равных 1; 0,9; 0,84; 0,7; 0,6; 0,5 и 0,4. Для расчета максимального значения скорости $w_{2кр}$ используют формулу (2). По указанным данным строят на миллиметровой бумаге теоретическую зависимость. Затем на тот же график наносят опытные точки. С помощью этого графика требуется определить опытное значение *критического отношения давлений* $\beta_{кр}$, сравнить его с теоретическим и определить погрешность.

Для двух значений β ($\beta_1 > \beta_{кр}$) и ($\beta_2 < \beta_{кр}$) необходимо снять с графика теоретические значения скорости воздуха, сравнить их с опытными и определить расхождение между ними (в процентах).

Объемный расход воздуха по показаниям газового счетчика определяется как разность его показаний, деленная на время, прошедшее между измерениями,

$$v = (v_2 - v_1) / \tau.$$

Для определения скорости воздуха на выходе из сопла используется формула

$$w_2 = v/f_2, \quad (3)$$

где f_2 – площадь выходного сечения сопла.

Диаметр выходного сечения сопла приводится в паспортных данных установки.

Время между фиксацией (записью) показаний счетчика обычно принимается равным 60 с.

Построению графика должно предшествовать заполнение таблицы опытных и расчетных данных (табл. 9).

Таблица 9

Опытные и расчетные данные

Номер опыта	$p_{1абс}$, МПа	$p_{2абс}$, МПа	$\beta_{оп}$	T_1 , К	T_2 , К	w_2 по формуле (3), м/с	β	w_2 по формуле (1) или (2), м/с

6. Отчет о работе

Отчет должен содержать:

- таблицу с данными наблюдений;
- таблицу опытных и обработанных данных;
- график зависимости $w_2 = f(\beta)$;
- опытное и расчетное значение $\beta_{кр}$;
- сравнение двух опытных значений w_2 с расчетными (снятыми с графика);
- характеристику приборов;
- анализ опытных данных и выводы по результатам работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТА ДЖОУЛЯ–ТОМСОНА

1. Задание

1. Составить четкое представление об эффекте Джоуля–Томсона.
2. На экспериментальном стенде произвести измерения величин, необходимых для расчета дифференциального и интегрального эффекта Джоуля–Томсона.
3. Сравнить вычисленные по опытным данным значения указанных величин с рассчитанными по теоретическим формулам.

2. Основные теоретические понятия

Эффектом Джоуля–Томсона называют изменение температуры рабочего вещества при прохождении через местное гидравлическое сопротивление. Детальная информация по этому эффекту приводится в учебнике [2]. Здесь же ограничимся краткими сведениями. Различают дифференциальный эффект Джоуля–Томсона – это отношение бесконечно малого изменения температуры вещества к бесконечно малому уменьшению давления в процессе дросселирования, т. е. $\alpha = (\partial T / \partial p)_h$, и интегральный эффект, определяемый как конечное изменение температуры ΔT , вызванное конечным изменением давления. Для идеального газа α и ΔT равны нулю.

Для реального рабочего вещества теория дает зависимость

$$\alpha = \frac{T(\partial v / \partial T)_p - v}{c_p}, \quad (4)$$

где v – удельный объем; c_p – изобарная теплоемкость.

В лабораторной работе в качестве рабочего вещества используется атмосферный воздух. При давлении до 1 МПа, используемом в лабораторной работе, поведение воздуха корректно определяется уравнением состояния [2] со вторым вириальным коэффициентом

$$p = \rho RT(1 + B\rho). \quad (5)$$

Здесь p – абсолютное давление, Па; ρ – плотность, кг/м³; R – удельная газовая постоянная воздуха, $R = 287,1$ Дж/(кг·К); T – температура, К; B – второй вириальный коэффициент, м³/кг.

В работе [3] показано, что дифференциальный эффект Джоуля–Томсона в рассматриваемом случае рассчитывается по уравнению

$$\alpha = \frac{T(dB/dT) - B}{c_p(1 + 2B\rho)} \quad (6)$$

Информация, необходимая для расчетов по формуле (6), приведена в прил. 3 к настоящему учебному пособию.

3. Лабораторная установка

Схема лабораторной установки представлена на рис. 9. Компрессор 1 предназначен для подачи воздуха через сепаратор 2 и холодильник 3 к измерительной ячейке 9. Давление воздуха перед ней измеряется с помощью датчика 5 и электронного блока 4, а также пружинным манометром 6. Регулировка давления перед измерительной ячейкой осуществляется основным вентиля 7, частичное закрытие которого приводит к росту давления перед измерительной ячейкой. Нижний ее конец соединен с магистралью, открытой на атмосферу. Чертеж измерительной ячейки представлен на рис. 10. Ячейка оборудована двумя хромель-копелевыми термопарами для измерения температуры воздуха на входе в ячейку и при выходе из нее. Ячейка содержит войлочную набивку, являющуюся гидравлическим сопротивлением.

4. Выполнение работы

После ознакомления с устройством установки и назначением всех ее элементов приступают к выполнению измерений. Подключают установку, а затем оба электронных блока к электросети. Для определения поправки Δt_0 записывают значения температур воздуха перед измерительной ячейкой и после неё. Поворотом против часовой стрелки открывают регулирующий вентиль 7 (см. рис. 9). Затем включают компрессор. Регулируя положение вентиля, устанавливают избыточное давление воздуха на входе в измерительную ячейку на уровне 0,3 МПа.

Через две минуты записывают в протокол наблюдений значения p_1 , p_2 (абсолютное давление, рассчитанное по показаниям манометра), t_1 , t_2 . Затем отключают компрессор, открывают регулирующий вентиль 7 и сбрасывают давление. Через две минуты, необходимые для остывания пускового реле компрессора, проводят вторую серию измерений, начиная с определения Δt_0 и придерживаясь описанной выше методики, но теперь давление по манометру перед измерительной ячейкой устанавливают на уровне 0,4 МПа. Третья серия измерений выполняется при избыточном давлении p_1 , равном 0,6 МПа. Каждую серию измерений следует повторить один–два раза.

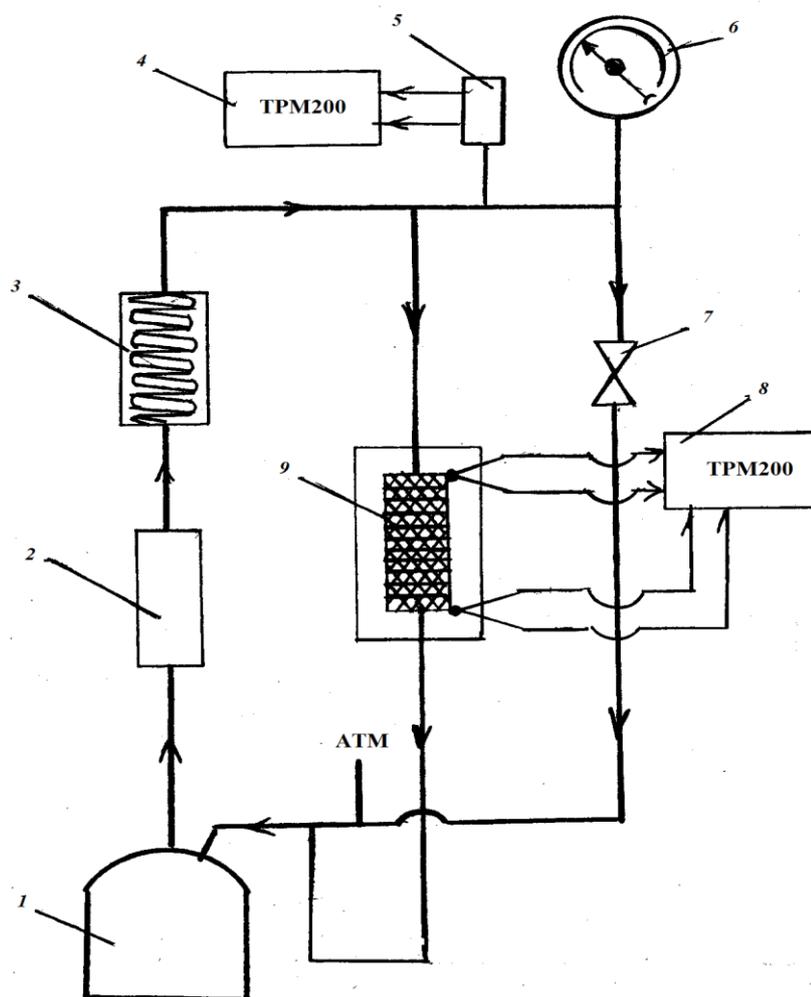


Рис. 9. Схема лабораторной установки:

- 1 – компрессор; 2 – сепаратор; 3 – холодильник; 4 – измеритель давления;
 5 – датчик давления; 6 – пружинный манометр; 7 – регулирующий вентиль;
 8 – измеритель температуры; 9 – измерительная ячейка

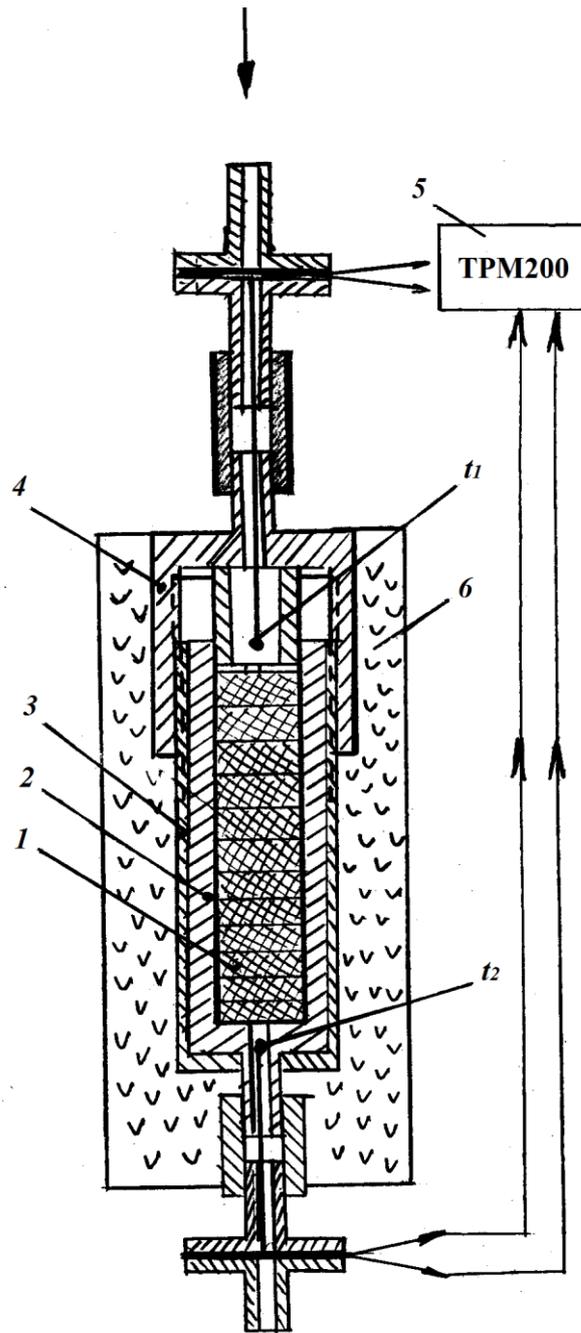


Рис. 10. Чертеж измерительной ячейки:
 1 – войлочная набивка; 2 – текстолитовая гильза;
 3 – металлическая оболочка; 4 – накидная гайка;
 5 – измеритель температур; 6 – теплоизолятор

Результаты четырех серий измерений вносят в протокол по форме табл. 10.

Таблица 10

Протокол измерений

Номер серии	Поправка Δt_0	Давление		Температура		Примечание
		p_1 , бар	p_2 , бар	t_1 , °C	t_2 , °C	
1						
2						
3						

5. Обработка результатов опыта

Для каждой из трех выполненных серий измерений вычисляют интегральный эффект Джоуля–Томсона, т. е. определяют разность температур $t_1 - t_2$ с учетом поправки Δt_0 . Вычисляют разность абсолютных давлений $p_1 - p_2$, которая вызвала этот эффект. Затем определяют дифференциальный эффект Джоуля–Томсона, равный отношению $\approx \Delta t / \Delta p$. Погрешность определения данного отношения может быть высокой и достигать 20 % из-за ошибки при измерении малой разности температур с помощью двух хромель-копелевых термомпар, погрешность которых может достигать 0,3–0,5 °C.

Для сравнения полученных опытных данных с теоретическим значением дифференциального эффекта Джоуля–Томсона его необходимо вычислить для воздуха при температуре 300 К и давлении 0,3 МПа. Величину эффекта нужно рассчитать, используя информацию о термодинамических свойствах воздуха (см. прил. 3) по трем формулам:

$$1) \alpha = \left(\frac{\partial t}{\partial p} \right)_h ;$$

$$2) \alpha = \frac{T(\partial v / \partial T)_p - v}{c_p};$$

$$3) \alpha = \frac{T(dB / dT) - B}{c_p(1 + 2B\rho)}.$$

При расчете по первой формуле принимаем $p_1 = 0,5$ МПа, $T_1 = 300$ К, $p_2 = 0,1$ МПа. Находим в приложении $h_1 = 552,81$ кДж/кг и линейной интерполяцией на изобаре $p_2 = 0,1$ МПа вычисляем t_2 с этим же значением энтальпии ($h_2 = h_1$). В связи с малым изменением α в этой области параметров состояния заменяем производную $(\partial t / \partial p)_h$ на отношение $\alpha = \Delta t / \Delta p$ при $h = \text{const}$.

При вычислениях по второй формуле по значениям плотности воздуха находим его удельный объем, затем вычисляем производную $(\partial v / \partial T)_p$ как $(\Delta v / \Delta T)_p$ на изобаре $0,3$ МПа. Затем определяем α на данной изобаре при $T \approx 290$ К.

При расчетах по третьей формуле используем значения второго вириального коэффициента воздуха и его производной при 300 К, а значения c_p и ρ берем при $p = 0,3$ МПа из прил. 3.

6. Отчет о работе

Отчет должен содержать:

- таблицу с данными наблюдений;
- расчеты, связанные с определением интегрального и дифференциального эффекта Джоуля–Томсона;
- характеристику приборов;
- анализ опытных данных и выводы по результатам работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ИЗОБАРНОЙ
ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА
ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

1. Задание

1. Ознакомиться с одним из методов проведения калориметрического эксперимента.
2. Определить опытным путем значение массовой изобарной теплоемкости воздуха. Сравнить полученные данные с табличными.

2. Основные теоретические понятия

Изучение теплоемкости играет важную роль в теории термодинамики. Так, например, экспериментальные исследования теплоемкости позволяют составлять уравнения состояния реальных газов, необходимые для вычисления их параметров. Велико и прямое прикладное значение теплоемкости при определении количества теплоты, участвующей в том или ином термодинамическом процессе.

Удельной (массовой) теплоемкостью называют количество теплоты, которое нужно сообщить 1 кг вещества, чтобы повысить его температуру на 1 К. Теплоемкость зависит от вида процесса, в котором осуществляется подвод теплоты к веществу. Из всего многообразия теплоемкостей в любых политропных процессах обычно выделяют изобарную c_p и изохорную c_v .

Изобарная теплоемкость имеет большое практическое значение, и ее определение осуществляется наиболее просто.

Основными методами измерения теплоемкости жидкостей и газов являются метод нагревания отдельной порции вещества и метод протока. При измерении теплоемкости газов (или паров) первым способом масса газа в калориметре обычно невелика и при подведении теплоты большая ее часть уходит на тепловые потери и нагревание деталей калориметра. Поэтому исследование тепловых свойств газов или паров производят в так называемых проточных калориметрах.

3. Лабораторная установка

Принципиальная схема установки изображена на рис. 11.

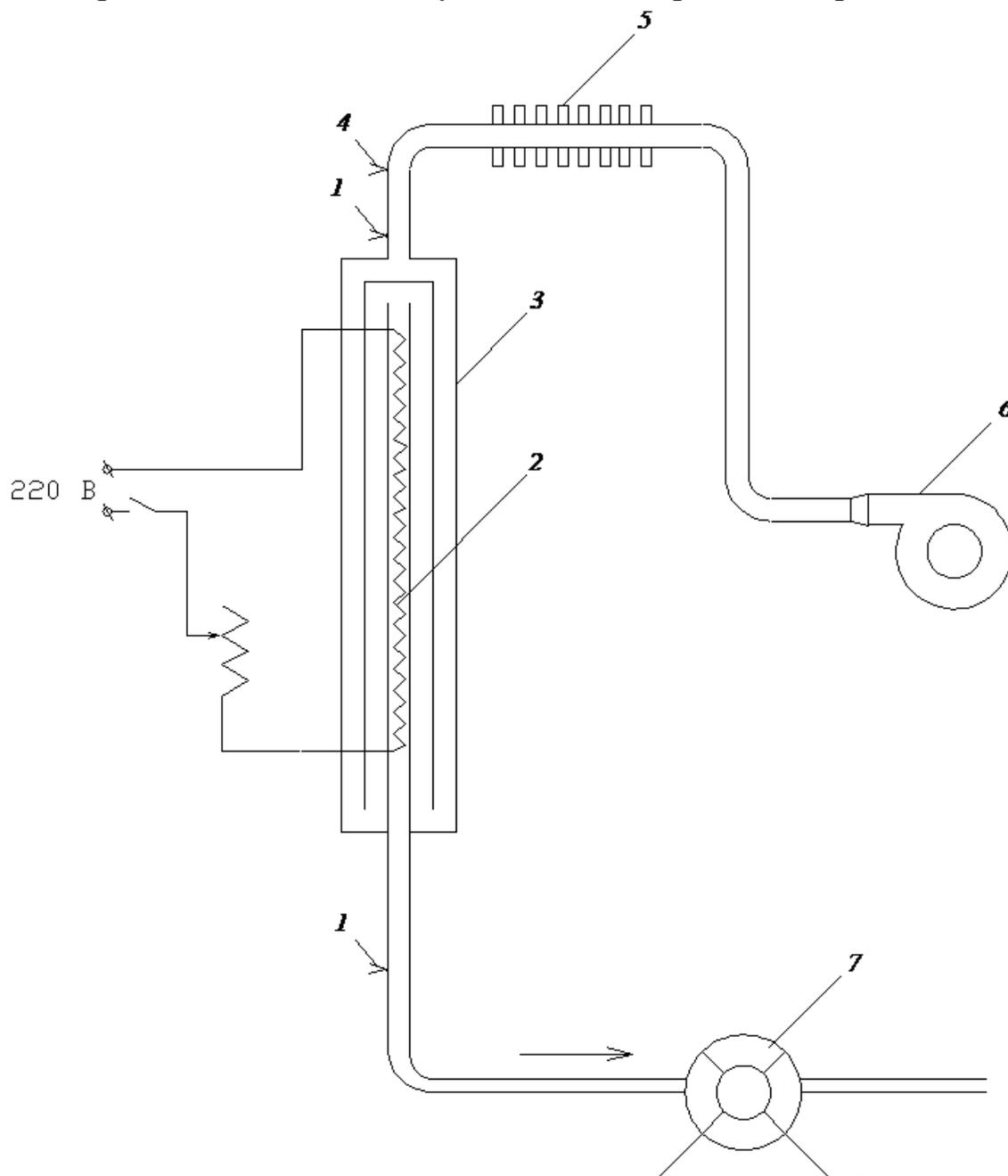


Рис. 11. Схема лабораторной установки:
1 – термопара; 2 – электрический нагреватель; 3 – калориметр;
4 – термопара; 5 – теплообменник-радиатор; 6 – вентилятор;
7 – расходомер

Исследуемый воздух засасывается из помещения лаборатории вентилятором 6, проходит последовательно через теплообменник-радиатор 5, калориметр 3 и расходомер 7, после чего снова выбрасывается в помещение лаборатории. Основными элементами установки являются проточный адиабатный калориметр и расходомер. Проточный калориметр представляет собой многоходовой теплообменник, в котором для уменьшения потерь теплоты электрический нагреватель 5 размещен в центральной стеклянной гильзе, а поток газа во внешних каналах служит для создания адиабатных условий на оболочке калориметра. Таким образом, здесь реализуется принцип «самоулавливания» тепловых потерь. В качестве нагревателя в калориметре используется нихромовая спираль с сопротивлением около 5 Ом.

Количество теплоты, отдаваемой нагревателем потоку воздуха в единицу времени, определяется с помощью ваттметра.

Температура газа на входе в калориметр определяется одиночной термопарой 1, а повышение температуры Δt – многоспайной дифференциальной термопарой 4.

Для измерения массового расхода газа используется тепловой неконтактный расходомер, в котором в качестве нагревателя и индикаторов температуры служат одни и те же элементы – катушки из медной проволоки. Они являются смежными плечами электрической мостовой схемы. За счет выделения теплоты катушками при пропускании через них электрического тока вдоль трубки устанавливается параболическое распределение температур, и в исходном состоянии (т. е. при протоке газа) мостовая схема уравнивается. Под действием потока газа в трубке первая по ходу катушка будет охлаждаться интенсивнее. Это приведет к изменению электрического сопротивления катушки и вызовет появление в измерительной диагонали моста напряжения разбаланса, величина которого зависит от расхода газа.

4. Выполнение работы

Нагреватель калориметра необходимо включить одновременно с вентилятором. Стационарный тепловой режим в калориметре устанавливается через 10–15 мин. Так как при этом всё-таки возможны небольшие колебания расхода воздуха и мощности электронагревателя, необходимо произвести не менее пяти измерений напряжения Δu раз-

баланса в расходомере, мощности нагревателя $Q_{эл}$, ЭДС в цепи термопар, измеряющих температуру воздуха на входе в калориметр $E_{вх}$, и повышение температуры воздуха в калориметре $E_{\Delta t}$. Все результаты измерений заносят в таблицу (табл. 11).

Таблица 11

Протокол наблюдений

Атмосферное давление $B =$ мм рт. ст.

Номер измерения	Δu , мВ	$Q_{эл}$, мВ	$E_{вх}$, мВ	$E_{\Delta t}$, мВ	Примечание
1					
2					
3					
4					
5					
Среднее значение					

Для дальнейших расчетов используют средние арифметические значения измеренных величин.

5. Обработка результатов опыта

По среднему значению напряжения разбаланса с помощью градуировочной таблицы находят среднее значение массового расхода воздуха в калориметре M_v .

По данным градуировки термопар определяют значения $t_{вх}$ и Δt .

Значение c_p изобарной теплоемкости воздуха рассчитывают по формуле

$$c_p = Q_{эл} / M_v \Delta t.$$

Полученное значение теплоемкости c_p воздуха сравнивают с табличным при температуре воздуха $t_{вх}$.

6. Отчет о работе

По окончании работы составляют отчет, который должен содержать:

- схему опытной установки с краткой спецификацией основных ее элементов;
- характеристику измерительных приборов;
- данные градуировки термопар;
- протокол наблюдений;
- результаты обработки опытных данных;
- сравнение опытного значения теплоемкости с табличным;
- анализ опытных данных и выводы по результатам работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛА ПАРОВОЙ КОМПРЕССОРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

1. Задание

1. Ознакомиться с устройством паровой компрессорной холодильной машины.
2. Провести непосредственное наблюдение за процессом кипения хладагента в испарителе.
3. Определить параметры в узловых точках цикла и построить цикл в диаграммах $p-v$; $T-s$; $\lg p-h$.
4. Определить холодопроизводительность машины и холодильный коэффициент цикла.

2. Основные теоретические понятия

Для понижения температуры тел ниже температуры окружающей среды и непрерывного поддержания заданной низкой температуры применяются холодильные машины. В данных машинах совершается серия процессов, в результате которых теплота отнимается от тел с низкой температурой и передается окружающей среде с более высокой температурой. Переход теплоты от менее нагретого к более нагретому телу в соответствии со вторым законом термодинамики возможен только в результате затраты некоторого количества внешней энергии. По виду затрат холодильные машины можно разделить на три группы: 1) компрессорные; 2) парожетторные; 3) абсорбционные. В компрессорных машинах получение холода сопровождается компенсирующим процессом превращения механической работы в теплоту.

Эффективность обратного цикла любой холодильной машины оценивается с помощью холодильного коэффициента. Он показывает, какое количество теплоты может быть отведено от охлаждаемых тел при затрате единицы работы.

3. Лабораторная установка

Установка для проведения работы создана на основе фреоновой компрессорной холодильной машины марки ВН-0,55. Схема установки показана на рис. 12. Компрессор 9 со встроенным и герметизированным электродвигателем засасывает пар хладагента R12 из испарителя 8, сжимает его и подает в конденсатор 12. Конденсация пара происходит внутри трубок; теплота отводится к окружающему воздуху. Для интенсификации процесса теплообмена трубки снаружи оребрены и с помощью вентилятора 13 обдуваются потоком воздуха. Жидкий хладагент собирается в ресивере 11, а затем через фильтросушитель 10 поступает к регулирующему вентилю 7. После дросселирования влажный пар хладагента с большим содержанием жидкости попадает в испаритель, где жидкость кипит при низком давлении p_0 . Испаритель выполнен в виде змеевика, погруженного в резервуар с циркулирующим в нем хладонносителем. Для того чтобы наблюдать за процессом кипения хладагента в испарителе, несколько его звеньев выполнены из стеклянных трубок. Теплота, необходимая для кипения хладагента, отнимается от хладонносителя, температура которого понижается на 5–10 °С.

Теплый хладонноситель из термостата 2, имитирующего охлаждаемое помещение, поступает в испаритель по трубке 6. Охлажденный хладонноситель сливается через трубку обратно в термостат. Циркуляция хладонносителя осуществляется с помощью погруженного центробежного насоса 4, находящегося в термостате. Хладонноситель подогревается электронагревателем 1 до постоянной температуры $t_{с1}$. Данная температура поддерживается периодическим включением и выключением электронагревателя с помощью специального реле, датчиком для которого является контактный термометр 3. В процессе работы изучаемой холодильной машины теплота отнимается от среды, подлежащей охлаждению (хладонносителя) и передается на более высокий температурный уровень (воздуху помещения).

4. Выполнение работы

В ходе опыта измеряют следующие величины: давление хладагента в испарителе p_0 и в конденсаторе p – с помощью двух образцовых манометров, расположенных на щите установки; температуру

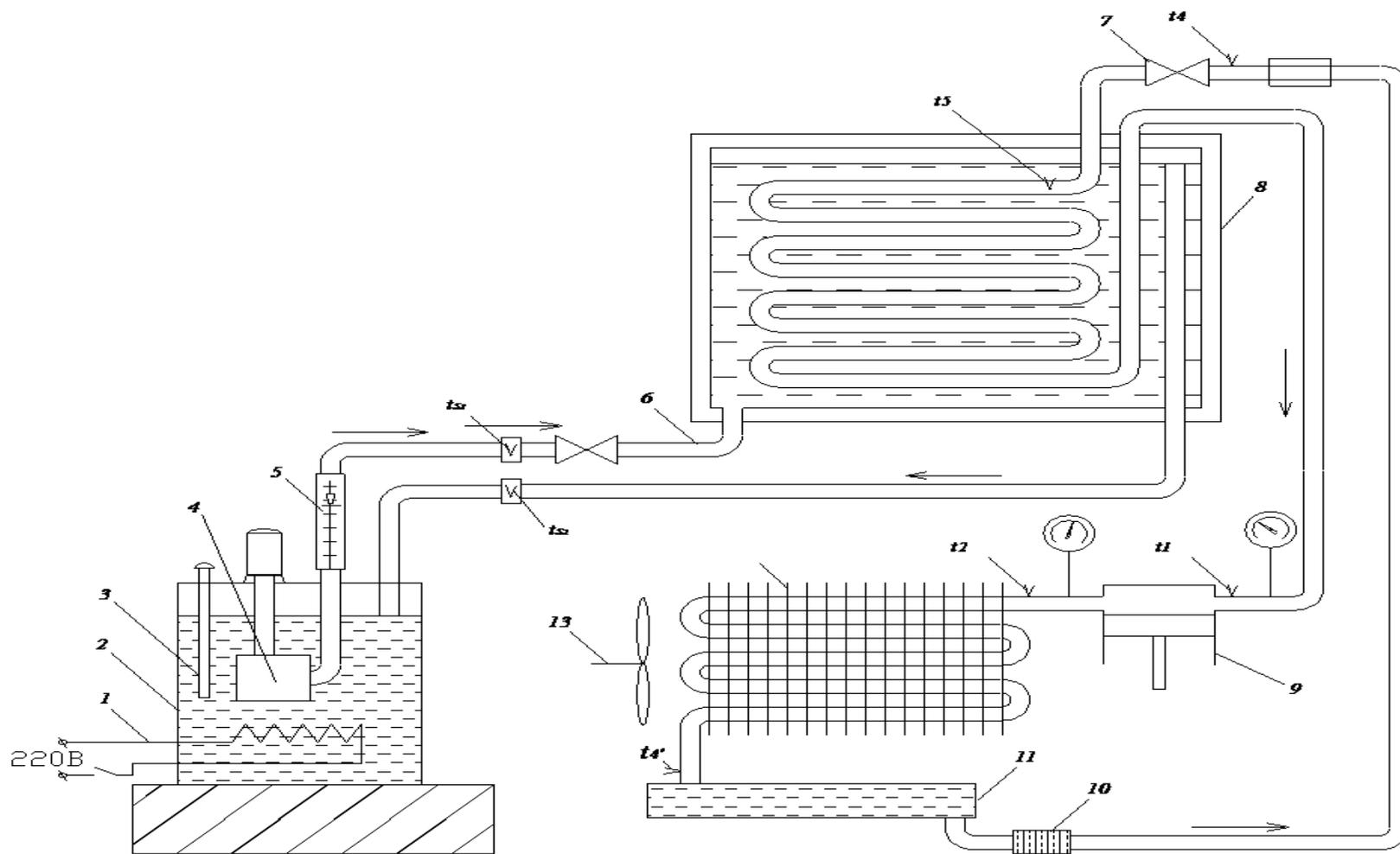


Рис. 12. Схема лабораторной установки:

- 1 – электронагреватель; 2 – термостат; 3 – термометр; 4 – центробежный насос; 5 – ротаметр; 6 – трубки;
 7 – вентиль; 8 – испаритель; 9 – компрессор; 10 – фильтр-осушитель; 11 – ресивер; 12 – конденсатор;
 13 – вентилятор

хладоносителя на входе в резервуар испарителя E_{s1} и на выходе из него E_{s2} – с помощью термопар; температуру хладагента на входе в компрессор E_1 , на выходе из компрессора E_2 , на выходе из конденсатора (насыщенная жидкость) $E_{4'}$, перед регулирующим вентиляем (ненасыщенная жидкость) E_4 , в испарителе (влажный пар) E_5 – с помощью медьконстантановых термопар. Один из спаев каждой термопары заключен в запаянную стальную иглу и введен в место измерения в трубку контура хладагента, второй – погружен в сосуд Дьюара со льдом. Электродвижущую силу термопар измеряют цифровым милливольтметром, который последовательно включают в цепь каждой термопары с помощью переключателя. Объемный расход хладоносителя измеряют поплавковым ротаметром 5 (см. рис. 12). Мощность, потребляемую совместно электродвигателями компрессора и воздушного вентилятора, измеряют ваттметром. Измерение всех величин производят пять раз с интервалом 5 мин. Данные наблюдений заносят в протокол (табл. 12). Для обработки берут средние арифметические величины двух измерений с наиболее близкими значениями.

Таблица 12

Протокол наблюдений

Номер измерения	Давление хладагента, дел.		ЭДС, мВ							Расход хладоносителя, дел.	Мощность электродвигателя, Вт
	p_0	p	E_1	E_2	$E_{4'}$	E_4	E_5	E_{s1}	E_{s2}		
1											
2											
3											
Среднее значение											

По числу делений манометра находят значения избыточных давлений p_0 и p , а затем, зная атмосферное давление, вычисляют абсолютное давление. Температуры хладагента определяют с помощью графика градуировки термопар, расход хладоносителя – по графику градуировки ротаметра.

5. Обработка результатов опыта

1. По измеренным температурам в узловых точках 1, 2, 3, 4, 4' и 5 строят цикл холодильной машины в диаграммах $T-s$ или $\lg p-h$. Значения давлений p_0 и p , найденные с помощью диаграммы, сравнивают со значениями давлений, измеренных в ходе работы с помощью манометра. Дают объяснение различию значений давлений, найденных этими двумя способами.

2. По диаграммам определяют и выписывают значения энтальпий во всех узловых точках цикла. Для точек 3, 4 и 6 значения энтальпий, найденные с помощью диаграммы, сверяют с табличными значениями.

3. Рассчитывают значения удельной холодопроизводительности, удельной работы адиабатного сжатия и удельной теплоты, отводимой в конденсаторе, Дж/кг,

$$q_0 = h_1 - h_5;$$

$$l_{\text{ад}} = h_2 - h_1;$$

$$q_1 = h_2 - h_4.$$

4. Производят проверку по тепловому балансу цикла

$$q_1 = q_0 + l_{\text{ад}}.$$

5. Определяется холодильный коэффициент цикла

$$\varepsilon = q_0/l_{\text{ад}}.$$

6. Полную холодопроизводительность машины Q_0 , Вт, определяют по изменению температуры хладоносителя

$$Q_0 = v \rho c_p (t_{s1} - t_{s2}),$$

где v – объемный расход хладоносителя, м³/с; ρ – плотность хладоносителя, кг/м³; c_p – удельная теплоемкость хладоносителя, кДж/(кг·К); t_{s1} и t_{s2} – температуры хладоносителя на входе и выходе соответственно, °С.

В табл. 13 приводятся значения плотности и удельной теплоемкости хладоносителя в зависимости от температуры.

Значения ρ и c_p в зависимости от t

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20
$\rho, \text{кг/м}^3$	825	816	808
$c_p, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	2266	2333	2403

6. Отчет о работе

Отчет должен содержать:

- таблицу с данными наблюдений;
- изображение цикла (не в масштабе) в диаграммах $p-v$; $T-s$; $\lg p-h$;
- значения энтальпий, определенные с помощью диаграмм для узловых точек цикла, и дополнительно – найденные по термодинамическим таблицам для точек 3, 4, 6;
- расчеты, связанные с определением q_0 , $l_{\text{ад}}$, q_1 , ε , Q_0 ;
- характеристику приборов;
- анализ опытных данных и выводы по результатам работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛА ТЕПЛООВОГО НАСОСА

1. Задание

1. Ознакомиться с устройством парокompрессионного теплового насоса.
2. Определить параметры в узловых точках цикла и построить цикл в диаграммах $p-v$; $T-s$; $\lg p-h$.
3. Определить удельную теплопроизводительность теплового насоса и отопительный коэффициент обратного цикла.

2. Основные теоретические понятия

Тепловые насосы представляют собой технические устройства для передачи теплоты от низкопотенциальных источников теплоты (воздух, вода, грунт) на более высокий температурный уровень для отопления помещений, горячего водоснабжения.

Переход теплоты от менее нагретого к более нагретому телу в соответствии со вторым законом термодинамики возможен только в результате затраты некоторого количества внешней энергии. По виду таких затрат тепловые насосы можно подразделить на три группы: 1) парокompрессионные; 2) парожеткторные; 3) абсорбционные. В парокompрессионных тепловых насосах получение теплоты высокого температурного потенциала сопровождается процессом превращения механической работы в теплоту.

Эффективность обратного цикла теплового насоса оценивается с помощью отопительного коэффициента. Он показывает, какое количество теплоты может быть передано нагреваемой среде при затрате единицы работы.

3. Лабораторная установка

Установка для проведения работы создана на основе сплит-системы кондиционера модели GU-ES09HR. В процессе работы изучаемого теплового насоса теплота отнимается от воздуха в помеще-

нии и передается на более высокий температурный уровень к среде, подлежащей нагреву.

Схема лабораторной установки показана на рис. 13. Спиральный герметичный компрессор 3 со встроенным электродвигателем в режиме теплового насоса засасывает пар хладагента R410A из испарителя 1, сжимает его и подает в конденсатор 6. Конденсация пара происходит внутри трубок; теплота отводится к окружающему воздуху. Для интенсификации процесса теплообмена трубки снаружи оребрены и с помощью вентилятора 5 обдуваются потоком воздуха. Жидкий R410A поступает к дроссельному устройству 7. После дросселирования влажный пар с большим содержанием жидкости попадает в испаритель, где жидкость кипит при низком давлении p_1 . Испаритель выполнен в виде оребренного теплообменника, обдуваемого потоком воздуха с помощью вентилятора 2. Теплота, необходимая для кипения хладагента, отнимается от воздуха в помещении, температура которого понижается.

4. Выполнение работы

В ходе опыта измеряются следующие величины. Давление R410A в испарителе p_1 и в конденсаторе p_2 – с помощью двух цифровых манометров, расположенных на щите установки. Температура парообразного хладагента (ХА) на входе в конденсатор t_3 и жидкости на выходе из него t_4 измеряется с помощью датчиков температуры T_3 и T_4 соответственно. Температура влажного пара на входе в испаритель t_2 и перегретого пара на выходе из него t_1 измеряется с помощью датчиков температуры T_2 и T_1 соответственно. Мощность, потребляемая совместно электродвигателями спирального компрессора, вентиляторов испарителя и конденсатора, измеряется ваттметром. Измерение всех величин производится пять раз с интервалом 5 мин. Данные наблюдений заносят в протокол наблюдений (табл. 14). Для обработки берут средние арифметические величины двух измерений с наиболее близкими значениями.

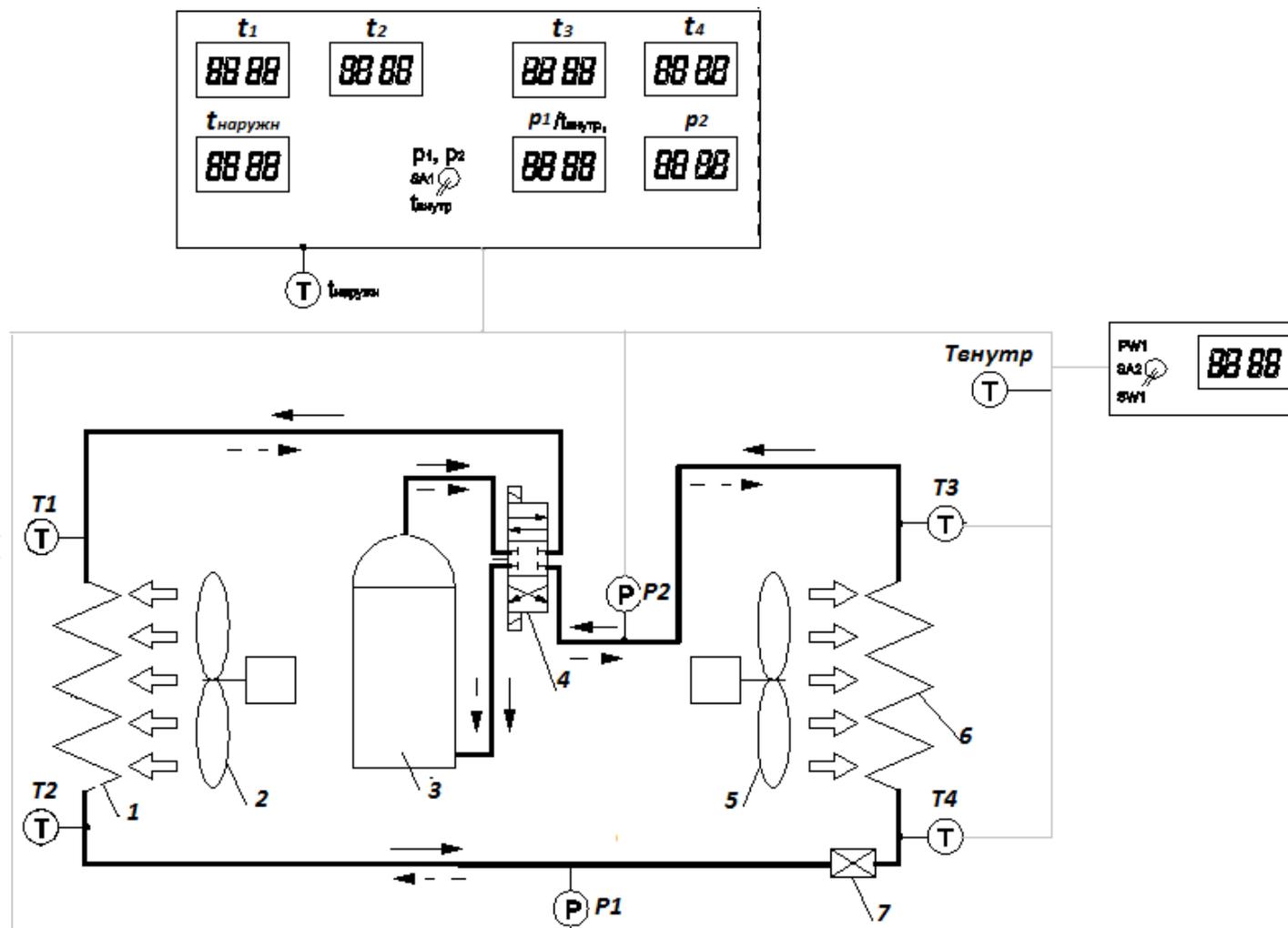


Рис. 13. Схема установки:
 1 – испаритель; 2, 5 – вентиляторы; 3 – компрессор; 4 – клапан; 6 – конденсатор;
 7 – дроссельное устройство

Протокол наблюдений

В = мм рт. ст.

Номер измерения	Давление ХА, МПа		Температура, °С						Потребляемая мощность, Вт
	p_1	p_2	t_1	t_2	t_3	t_4	$t_{\text{внутр}}$	$t_{\text{наружн}}$	
1									
2									
3									
Среднее значение									

Измерив атмосферное давление по барометру, вычисляют значения абсолютного давления p_1 и p_2 .

5. Обработка результатов опыта

1. По измеренным температурам в узловых точках 1, 2, 3, 4 строят цикл теплового насоса в диаграммах $T-s$ или $\lg p-h$. Значения давления p_1 и p_2 , найденные с помощью диаграммы или таблиц [4], сравнивают со значениями давления, измеренного в ходе работы с помощью цифровых манометров. Дают объяснение различию значений давления, найденных этими двумя способами.

2. По диаграммам определяют и выписывают значения энтальпий во всех узловых точках цикла. Для точек 1, 2, 3, 4 значения энтальпий, найденные с помощью диаграммы, сверяются с табличными значениями.

3. Рассчитывают значения удельной работы сжатия, удельной теплопроизводительности, Дж/кг,

$$l_{\text{сж}} = h_3 - h_1;$$

$$q_1 = h_3 - h_4.$$

4. Определяют отопительный коэффициент цикла

$$\mu = q_1 / l_{\text{сж}}.$$

6. Отчет о работе

Отчет должен содержать:

- таблицу с данными наблюдений;
- изображение цикла (не в масштабе) в диаграммах $p-v$; $T-s$; $\lg p-h$;
- значения энтальпий, определенные с помощью диаграмм для узловых точек цикла, и дополнительно – найденные по термодинамическим таблицам для точек 1, 2, 3, 4;
- расчеты, связанные с определением q_1 , $l_{сж}$, μ ;
- характеристику приборов;
- анализ опытных данных и выводы по результатам работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лабораторный практикум по термодинамике: Учеб. пособие / С.Н. Богданов, Г.Н. Данилова, А.В. Клецкий, А.В. Куприянова, В.Н. Филаткин, М.Г. Щербов и др. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012. – 82 с.
2. Теоретические основы хладотехники. Ч. 1. Термодинамика / Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Колос, 1994. – 288 с.
3. **Клецкий А.В., Митропов В.В.** Соотношение между эффектом Джоуля–Томсона и вторым вириальным коэффициентом // Вестник МАХ. 2012. № 2. С. 19.
4. **Цветков О.Б., Лаптев Ю.А.** Таблицы свойств холодильных агентов. – СПб.: НИУ ИТМО, ИХиБТ, 2013. – 52 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

ФОРМА ТАБЛИЦЫ «Характеристика приборов»

№ п/п	Наименование прибора	Заводской номер	Тип, марка	Единица измерения величины	Пределы измерения	Цена деления	Погрешность
1							
2							
3							

Приложение 2

ФОРМА ТАБЛИЦЫ «Данные градуировки термопары»

$t, ^\circ\text{C}$				
ЭДС, мВ				

Приложение 3

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ О ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ВЕЩЕСТВ

Таблица 3.1

Термодинамические свойства хладагента R12 на линии насыщения

T, K	273,15	275,15	277,15	279,15	281,15	283,15	285,15	287,15
$p, \text{МПа}$	0,308	0,329	0,351	0,374	0,398	0,423	0,449	0,477
T, K	289,15	291,15	293,15	295,15	297,15	299,15	301,15	303,15
$p, \text{МПа}$	0,505	0,535	0,566	0,599	0,633	0,668	0,705	0,744
T, K	305,15	307,15	309,15	311,15	313,15	315,15		
$p, \text{МПа}$	0,783	0,825	0,868	0,912	0,959	1,007		

Таблица 3.2

**Термодинамические свойства хладагента R13
на линии насыщения**

$t_H, ^\circ\text{C}$	0	10	20	28	28,84
T_H, K	273,15	283,15	293,15	301,15	301,99
$p, \text{МПа}$	1,977	2,524	3,180	3,807	3,870
$v' \cdot 10^3, \text{м}^3/\text{кг}$	0,895	0,967	1,086	1,347	1,808
$v'' \cdot 10^3, \text{м}^3/\text{кг}$	7,435	5,420	3,756	2,345	1,808

Таблица 3.3

**Термодинамические свойства перегретых
паров хладагента R13**

$p, \text{МПа}$	$v \cdot 10^3, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$v \cdot 10^3, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
	$T = 273,15 \text{ K}$			$T = 283,15 \text{ K}$		
2,0	0,894	400,6	4,003	8,208	499,1	4,362
3,0	0,878	399,8	3,996	0,950	412,7	4,043
4,0	0,864	399,2	3,991	0,924	411,3	4,034
6,0	0,843	398,5	3,982	0,889	409,7	4,022
8,0	0,827	398,0	3,974	0,865	408,8	4,013
	$T = 293,15 \text{ K}$			$T = 303,15 \text{ K}$		
2,0	8,978	508,1	4,393	9,665	516,5	4,421
2,5	6,420	501,2	4,357	7,112	511,0	4,389
3,0	4,471	491,2	4,313	5,309	504,1	4,356
3,5	1,054	427,3	4,091	3,843	494,3	4,317
4,0	1,020	425,5	4,084	1,485	454,1	4,179
6,0	0,951	421,9	4,065	1,041	435,6	4,111
8,0	0,913	420,1	4,052	0,974	432,3	4,093

Таблица 3.4

**Термодинамические свойства воды и водяного пара
на линии насыщения**

t_n , °C	p , МПа	v'	v''	h'	h''	r , кДж/кг
		м ³ /кг		кДж/кг		
100	0,101	0,00104	1,674	419,06	2676,3	2257,2
105	0,121	0,00105	1,420	440,17	2684,1	2243,9
110	0,143	0,00105	1,211	461,3	2691,8	2230,5
115	0,169	0,00106	1,037	482,5	2699,3	2216,8
120	0,198	0,00106	0,892	503,7	2706,6	2202,9
125	0,232	0,00106	0,771	525,0	2713,8	2188,8
130	0,270	0,00107	0,668	546,3	2720,7	2174,4
135	0,313	0,00108	0,582	567,7	2727,4	2159,7
140	0,361	0,00108	0,509	589,1	2734,0	2144,9
145	0,416	0,00108	0,446	610,6	2740,3	2129,7
150	0,476	0,00109	0,393	632,2	2746,3	2114,1

Таблица 3.5

Термодинамические свойства перегретого водяного пара

t , °C	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)
	$p = 0,1$ МПа			$p = 0,12$ МПа			$p = 0,14$ МПа		
100	1,696	2676,5	7,3628	–	–	–	–	–	–
110	1,745	2696,7	7,4164	1,450	2694,5	7,328	1,239	2692,2	7,252
120	1,793	2716,8	7,4681	1,491	2714,8	7,380	1,275	2712,8	7,305
130	1,841	2736,8	7,518	1,531	2735,0	7,431	1,309	2733,2	7,3559
140	1,889	2756,6	7,567	1,571	2755,0	7,480	1,344	2753,4	7,406
150	1,937	2776,4	7,614	1,611	2775,0	7,528	1,378	2773,5	7,454
200	2,172	2875,2	7,835	1,808	2874,2	7,749	1,548	2873,3	7,676
220	2,266	2914,7	7,917	1,887	2913,9	7,881	1,616	2913,1	7,759
240	2,359	2954,3	7,995	1,965	2953,6	7,910	1,683	2952,9	7,838
260	2,453	2994,1	8,071	2,043	2993,5	7,986	1,750	2992,9	7,914
280	2,546	3034,0	8,145	2,120	3033,5	8,060	1,816	3032,9	7,988
300	2,639	3074,1	8,216	2,198	3073,6	8,131	1,883	3073,1	8,060

Продолжение табл. 3.5

t , °C	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)
	$p = 0,15$ МПа			$p = 0,2$ МПа			$p = 0,25$ МПа		
200	1,444	2872,8	7,644	1,080	2870,5	7,507	0,862	2868,0	7,400
210	1,476	2892,8	7,686	1,104	2890,6	7,549	0,881	2888,3	7,443
220	1,507	2912,7	7,726	1,128	2910,6	7,590	0,900	2908,6	7,484
230	1,539	2932,6	7,766	1,152	2930,7	7,631	0,919	2928,8	7,525
240	1,570	2952,6	7,806	1,175	2950,8	7,670	0,938	2949,0	7,565
250	1,601	2972,5	7,844	1,199	2970,9	7,709	0,957	2969,2	7,604
260	1,632	2992,5	7,882	1,222	2991,0	7,747	0,976	2989,4	7,642
270	1,664	3012,6	7,919	1,246	3011,1	7,785	0,995	3009,7	7,680
280	1,695	3032,6	7,956	1,269	3031,3	7,821	1,014	3039,9	7,716
290	1,726	3052,8	7,992	1,293	3051,5	7,858	1,033	3050,2	7,753
300	1,757	3072,9	8,028	1,316	3071,7	7,893	1,052	3070,4	7,788

Окончание табл. 3.5

t , °C	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)
	$p = 0,3$ МПа			$p = 0,36$ МПа		
200	0,716	2865,6	7,312	0,595	2862,6	7,223
210	0,732	2886,1	7,355	0,609	2883,4	7,267
220	0,749	2906,5	7,397	0,622	2904,0	7,309
230	0,765	2926,9	7,438	0,636	2924,5	7,350
240	0,780	2947,2	7,478	0,649	2945,1	7,391
250	0,796	2967,5	7,517	0,662	2965,5	7,430
260	0,812	2987,9	7,556	0,676	2986,0	7,469
270	0,828	3008,2	7,593	0,689	3006,4	7,507
280	0,844	3028,5	7,630	0,702	3026,8	7,544
290	0,860	3048,8	7,667	0,715	3047,3	7,581
300	0,875	3069,2	7,703	0,728	3067,7	7,617

Таблица 3.6

Термодинамические свойства воздуха

Температура, К	B , см ³ /г	dB/dT , см ³ /(г·К)	$p = 0,1$ МПа			$p = 0,3$ МПа			$p = 0,5$ МПа		
			ρ , кг/м ³	h , кДж/кг	c_p , кДж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	h , кДж/кг	c_p , кДж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	h , кДж/кг	c_p , кДж/(кг·К)
280	0,4161	$7,958 \cdot 10^{-3}$	1,245	533,63	1,006	3,7377	533,08	1,010	6,236	532,54	1,014
290	0,3398	$7,322 \cdot 10^{-3}$	1,202	543,69	1,006	3,6076	543,18	1,010	6,017	542,68	1,013
300	0,2695	$6,755 \cdot 10^{-3}$	1,161	553,75	1,007	3,4864	553,28	1,010	5,814	552,81	1,013

Таблица 3.7

Термодинамические свойства R410A на линии насыщения

$t_{\text{н}},$ °C	p'	p''	ρ'	ρ''	h'	h''	s'	s''
	МПа		м ³ /кг		кДж/кг		кДж/(кг·К)	
0	0,80070	0,79805	1170,0	30,576	200,00	421,31	1,0000	1,8104
10	1,0884	1,0848	1128,4	41,917	215,46	423,96	1,0547	1,7912
20	1,4476	1,4430	1083,1	56,814	231,54	425,73	1,1094	1,7719
30	1,8893	1,8835	1032,7	76,553	248,41	426,31	1,1645	1,7515
40	2,4256	2,4187	975,33	103,27	266,33	425,26	1,2210	1,7286
50	3,0706	3,0628	906,80	141,14	285,85	421,72	1,2801	1,7007
60	3,8418	3,8344	815,49	200,78	308,41	413,54	1,3461	1,6618

Таблица 3.8

Термодинамические свойства перегретых паров R410A

$t,$ °C	$\rho,$ кг/м ³	$h,$ кДж/кг	$s,$ кДж/(кг·К)	$\rho,$ кг/м ³	$h,$ кДж/кг	$s,$ кДж/(кг·К)
	$t = 0$ °C ($p = 0,8007$ МПа)			$t = 10$ °C ($p = 1,0884$ МПа)		
10	28,714	432,03	1,8102	1128,4	215,46	1,0547
20	27,106	442,15	1,8486	39,102	435,51	1,8310
30	25,747	451,94	1,8838	36,743	446,29	1,8672
40	24,570	461,55	1,9166	34,789	456,63	1,9007
50	23,530	471,08	1,9478	33,118	466,72	1,9324
60	22,601	480,58	1,9777	31,659	476,67	1,9628
70	21,761	490,09	2,0067	30,366	486,55	1,9920
80	20,995	499,64	2,0348	29,205	496,41	2,0203
90	20,293	509,25	2,0622	28,154	506,28	2,0479
100	19,644	518,93	2,0891	27,193	516,19	2,0748

Окончание табл. 3.8

t , °C	ρ , кг/м ³	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)
	$t = 20$ °C ($p = 1,4476$ МПа)			$t = 30$ °C ($p = 1,8893$ МПа)		
10	1130,8	215,42	1,0534	1133,7	215,38	1,0519
20	1083,1	231,54	1,1094	1086,9	231,39	1,1075
30	52,492	438,31	1,8139	69,740	440,30	1,7967
40	49,022	449,89	1,8514	64,586	452,85	1,8362
50	46,216	460,86	1,8860	60,552	464,58	1,8719
60	43,859	471,49	1,9183	57,237	475,82	1,9052
70	41,829	481,91	1,9492	54,425	486,77	1,9366
80	40,047	492,21	1,9788	51,987	497,54	1,9667
90	38,461	502,45	2,0073	49,838	508,19	1,9956
100	37,033	512,68	2,0351	69,740	440,30	1,7967
	$t = 40$ °C ($p = 2,4256$ МПа)			$t = 50$ °C ($p = 3,0706$ МПа)		
10	1137,1	215,34	1,0501	1141,0	215,30	1,0479
20	1091,3	231,23	1,1052	1096,4	231,07	1,1027
30	1038,9	248,05	1,1616	1045,8	247,67	1,1583
40	917,27	267,53	1,2248	985,94	265,53	1,2163
50	92,054	441,29	1,7788	906,81	285,85	1,2801
60	84,285	455,08	1,8208	121,26	441,03	1,7594
70	78,455	467,71	1,8582	109,28	456,44	1,8050
80	73,790	479,66	1,8925	100,78	470,15	1,8444
90	69,909	491,20	1,9247	94,202	482,93	1,8801
100	66,590	502,48	1,9554	88,850	495,14	1,9133

ДИАГРАММЫ

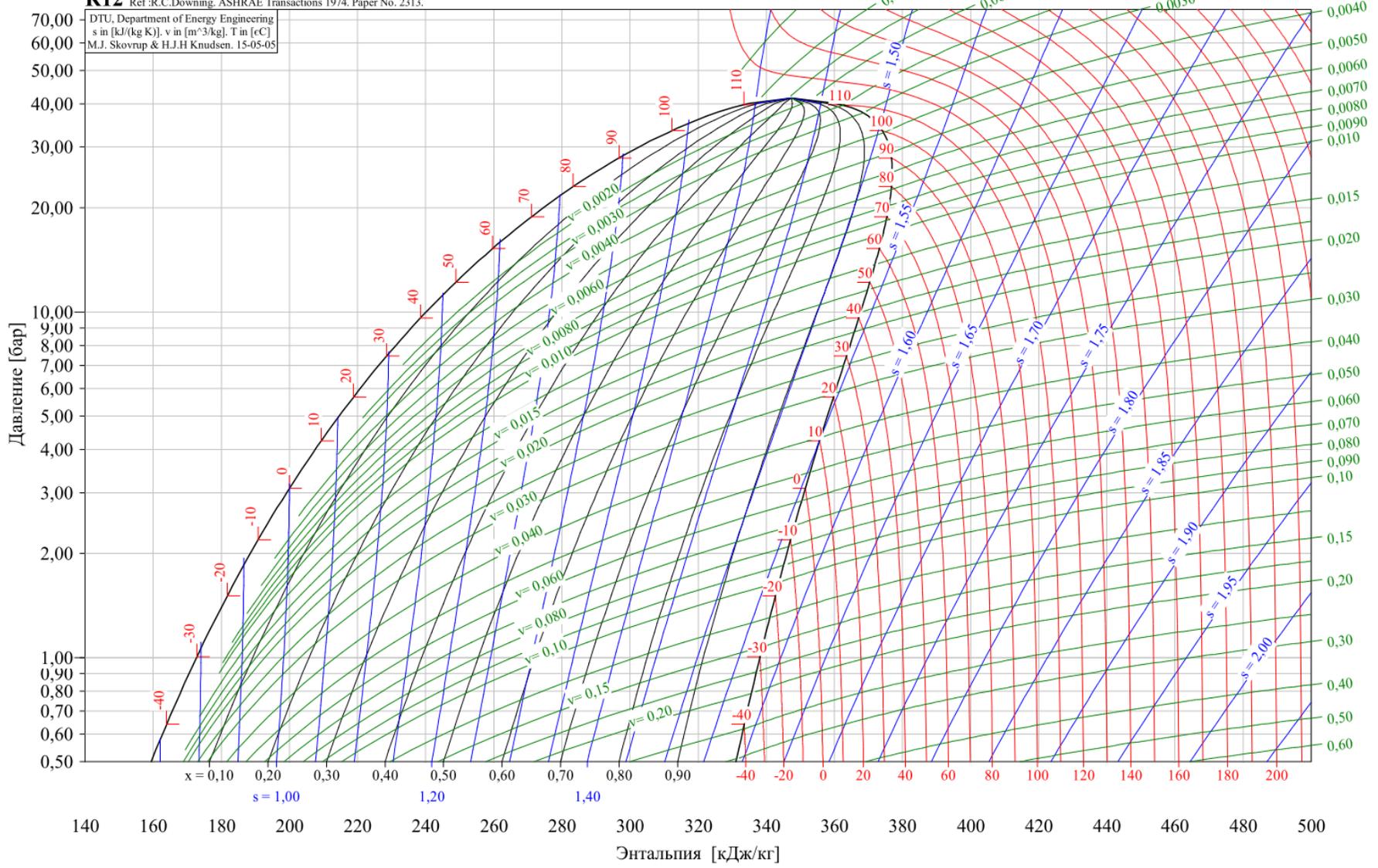
4.1. $T-s$ – диаграмма водяного пара

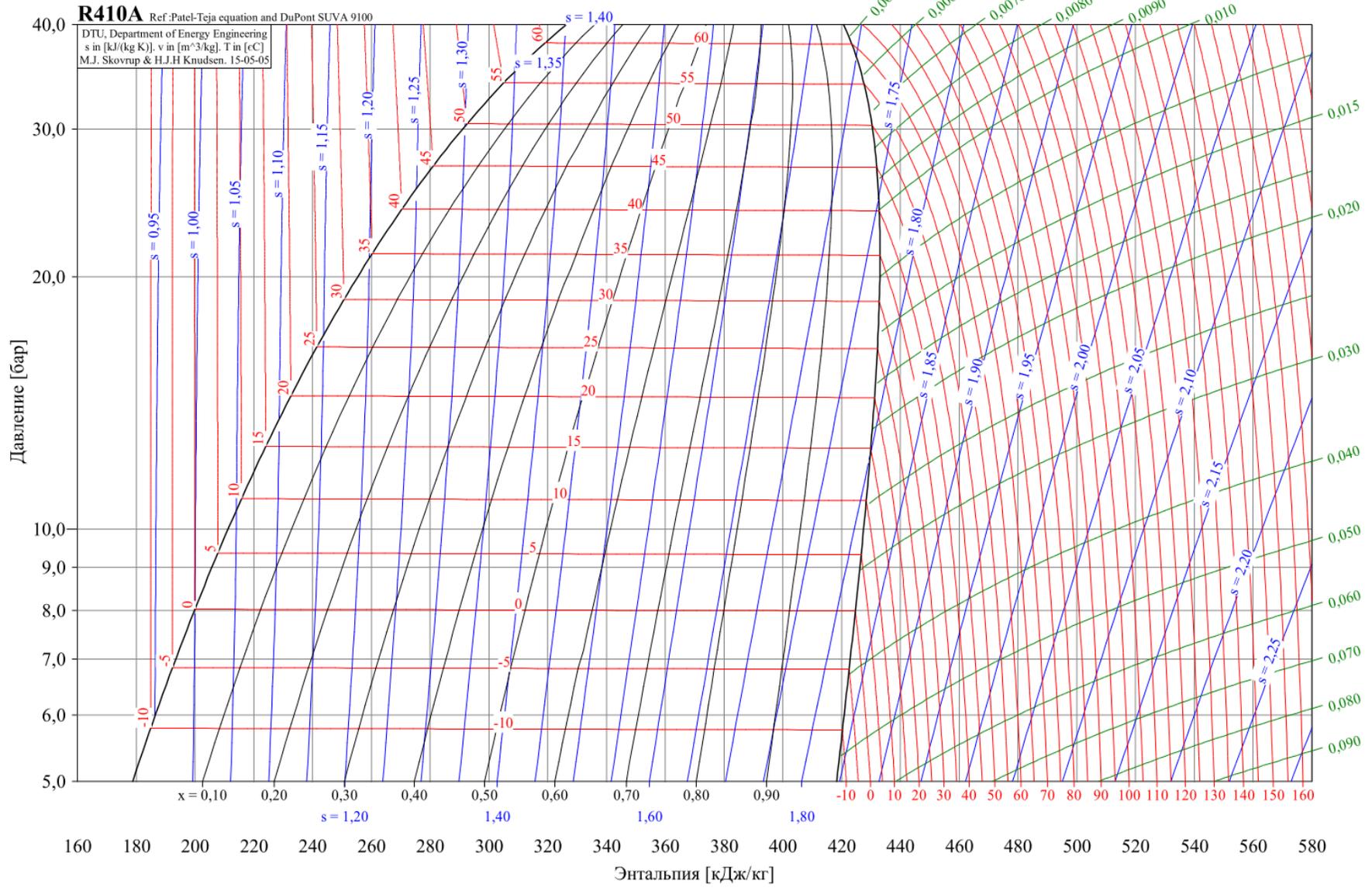
4.2. $h-lg p$ – диаграмма хладагента R12

4.3. $h-lg p$ – диаграмма хладагента R410A

R12 Ref: R.C. Downing, ASHRAE Transactions 1974, Paper No. 2313.

DTU, Department of Energy Engineering
s in [kJ/(kg K)], v in [m³/kg], T in [°C]
M.J. Skovrup & H.J.H Knudsen, 15-05-05





СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ В УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ ТОТХТ.....	5
ВЫПИСКА ИЗ ПРАВИЛ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ ТОТХТ	6
СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТАХ.....	8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.....	12
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.....	21
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.....	27
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.....	34
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.....	40
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.....	47
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7.....	53
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8.....	59
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9.....	64
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10.....	70
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	75
ПРИЛОЖЕНИЯ	76

Клёцкий Александр Владимирович
Цветков Олег Борисович
Митропов Владимир Викторович
Богданов Сергей Николаевич
Филаткин Владимир Николаевич
Федоров Валерий Николаевич
Пятаков Георгий Леонидович

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ

Учебное пособие

Ответственный редактор

Т.Г. Смирнова

Редактор

Т.В. Белянкина

Компьютерная верстка

Н.В. Гуральник

Дизайн обложки

Н.А. Потехина

Подписано в печать 30.03.2016. Формат 60×84 1/16

Усл. печ. л. 5,35. Печ. л. 5,75. Уч.-изд. л. 5,5

Тираж 70 экз. Заказ № С 1

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9