

# **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ**

Учебное пособие

Санкт-Петербург

**Федеральное агентство по образованию**  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



# **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ**

Учебное пособие

УДК 621.1016+621.56  
ББК 22.317  
Л 12

Санкт-Петербург 2005

Л 12

**Лабораторный практикум по термодинамике:**  
Учеб. пособие / С.Н. Богданов, Г.Н. Данилова, А.В. Клецкий,  
А.В. Куприянова, В.Н. Филаткин, М.Г. Щербов, О.Б. Цветков,  
В.В. Федоров, В.В. Митропов. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005.  
– 79 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.

УДК 621.1016+621.56

ББК 22.317

Рецензенты

Кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга  
Санкт-Петербургского государственного университета информационных  
технологий, механики и оптики (доктор техн. наук, проф. А.В. Шарков)

Доктор техн. наук, проф. кафедры тепло- и газоснабжения и охраны воздушного бассейна Е.Т. Васьков (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет)

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом университета

© Санкт-Петербургский государственный  
университет

низкотемпературных  
и пищевых технологий, 2005

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В лаборатории термодинамики кафедры теоретических основ тепло- и хладотехники проводятся работы, которые дают возможность ознакомиться с методами измерения термодинамических параметров рабочих тел (температуры, энтальпии, степени сухости пара), с 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. Эти 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 прил. 1, 2 к лабораторным работам № 7, 8, 9 приведены формы общих для всех лабораторных работ отчетных таблиц («Характеристика приборов», «Данные градуировки термопар») и элементы справочных таблиц термодинамических характеристик веществ, необходимых для расчетов.

В разработке экспериментальных установок лаборатории принимали участие: В.Н. Федоров, Г.Н. Данилова, А.В. Куприянова, М.Г. Щербов, С.Н. Богданов, В.Н. Филаткин, А.В. Клецкий, В.В. Митропов.

## **ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ В УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ**

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 разрешается 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**

## **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.

## **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 нельзя допускать превышения давления, указанного для данной работы в учебном пособии.

Если давление превысит допустимый предел, 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.

## **Правила работы на установках, питаемых электричеством**

**З а п р е щ а е т с я :**

- 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 незаземленных 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:

1) немедленно остановить установку и полностью выключить электроток;

2) электропроводку тушить только углекислотными огнетушителями.

## **НЕКОТОРЫЕ 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 (чаще всего ртутные) термометры применяются при измерениях температур от минус 60 до плюс 750 °С. Преимуществом термометра является возможность отсчета температуры непосредственно по его шкале.

Недостатки этого 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 большим погрешностям измерения. Из-за большой тепловой инерции ртутные термометры не могут применяться для измерения быстро меняющихся температур, а также ввиду относительно больших размеров ртутной ампулы 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.

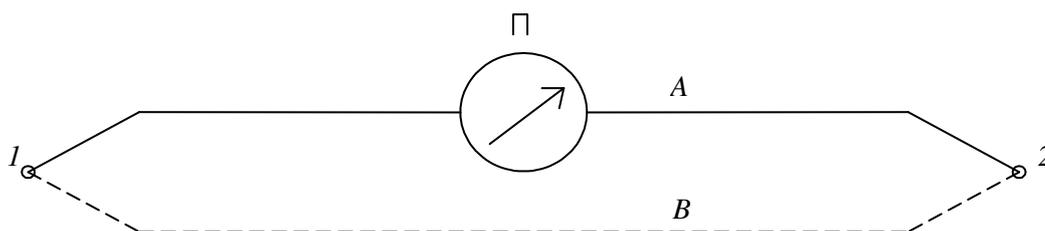
Термометр, предназначенный для лабораторных измерений, должен быть снабжен свидетельством (паспортом), в котором указываются результаты поверки данного термометра по эталонному.

Проверка основных точек шкалы термометра может быть произведена в лаборатории путем погружения его в тающий лед ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и насыщенный пар чистой воды, кипящей при давлении  $101\text{ кПа}$  ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). При этом термометр должен быть опущен в соответствующую среду в вертикальном положении до деления шкалы, соответствующего измеряемой температуре.

## Термопары

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

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. Электродвижущая сила 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 электродвижущей силы  $E$ , развиваемая термопарой, зависит только от температуры другого спаев  $t$ . Спай, температура которого поддерживается при измерениях постоянной, называется «холодным». Спай, который помещается в места измерения температуры, называется «горячим». Функциональная зависимость  $E = f(t)$  определяется опытным путем. Электродвижущая сила  $E$ , которая возникает в цепи термопары, невелика (от  $40$  до  $70\text{ мкВ}$  на  $1\text{ К}$ ). Она может быть измерена посредством электроизмерительного прибора П.

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, а холодный – в сосуд Дьюара (термос) со льдом и отметив показания прибора, можно определить по градуировочной таблице или графику соответствующую температуру.

### **Пружинные манометры**

Для измерения давления в лаборатории используются пружинные приборы. Устройство таких приборов 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 может быть использована также и для измерения вакуума. Трубчатые манометры применяются для измерения давления до 500 МПа.

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

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ И ДАВЛЕНИЕМ НАСЫЩЕННОГО ПАРА ХЛАДАГЕНТА R12

#### 1. Задание

1. Иметь четкое представление о каждом из возможных состояний жидкости и пара (насыщенная и ненасыщенная жидкости; влажный, сухой насыщенный и перегретый пар; критическое состояние). Уяснить физический смысл и взаимосвязь 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

Хладоны относятся к классу галоидных производных насыщенных углеводородов. Так, хладагент R12 может быть получен при замещении атомов водорода в молекуле метана  $\text{CH}_4$  двумя атомами фтора и двумя атомами хлора.

Химическая формула хладагента R12 –  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ . 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 хладагент R12, выкипая и превращаясь в сухой насыщенный пар, может от-

нять 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. 1. Вправо от кривой расположена область перегретого пара, влево – область жидкости. Вся область влажного пара (двухфазного состояния) изобразится на диаграмме  $p-T$  этой кривой фазового перехода.

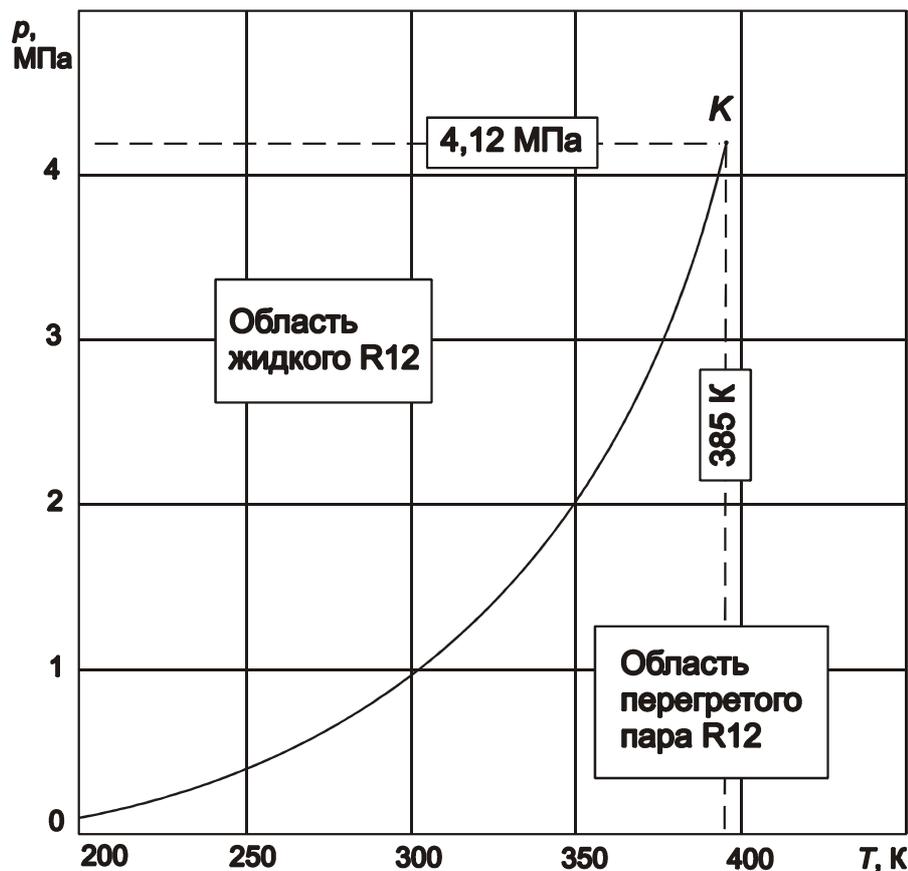


Рис. 1. Диаграмма  $p-T$  для хладагента R12

Кривая парообразования имеет ограниченную протяженность между тройной и критической точками вещества.

В тройной точке существуют и находятся в термодинамическом равновесии три различные фазы вещества (твердая, жидкая и парообразная). Тройная точка хладагента R12 (на рис. 1 не показана) лежит в области весьма низких значений давления и температуры (117 К).

Точка  $K$  называется критической точкой. При значениях параметров больше  $p_k$  или  $T_k$  (для хладагента R12  $p_k = 4,12$  МПа;  $T_k = 385$  К и  $v_k = 1,76$  см<sup>3</sup>/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 (плюс 112 °С), 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. 2.

Основной элемент установки – кипятивильник-конденсатор, который представляет собой закрытый вертикально расположенный полый цилиндр, выполненный из малотеплопроводной нержавеющей стали. Верхняя часть этого цилиндра является конденсатором, она охвачена змеевиком 2, внутри которого циркулирует водопроводная вода, отводящая теплоту конденсации пара хладона. Смотровое окно 5 позволяет наблюдать процесс кипения хладона во время опыта. В нижней части корпуса, служащей кипятивильником, находится электронагреватель 6. Он представляет собой теплопроводный кожух, внутри которого находится электрическая спираль. На крышке кипятивильника расположен вентиль для заполнения установки хладоном и установки манометра 1. На шкале манометра имеется красная черта, указывающая предельно допустимое давление в установке ( $p_{изб} = 0,9$  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 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.

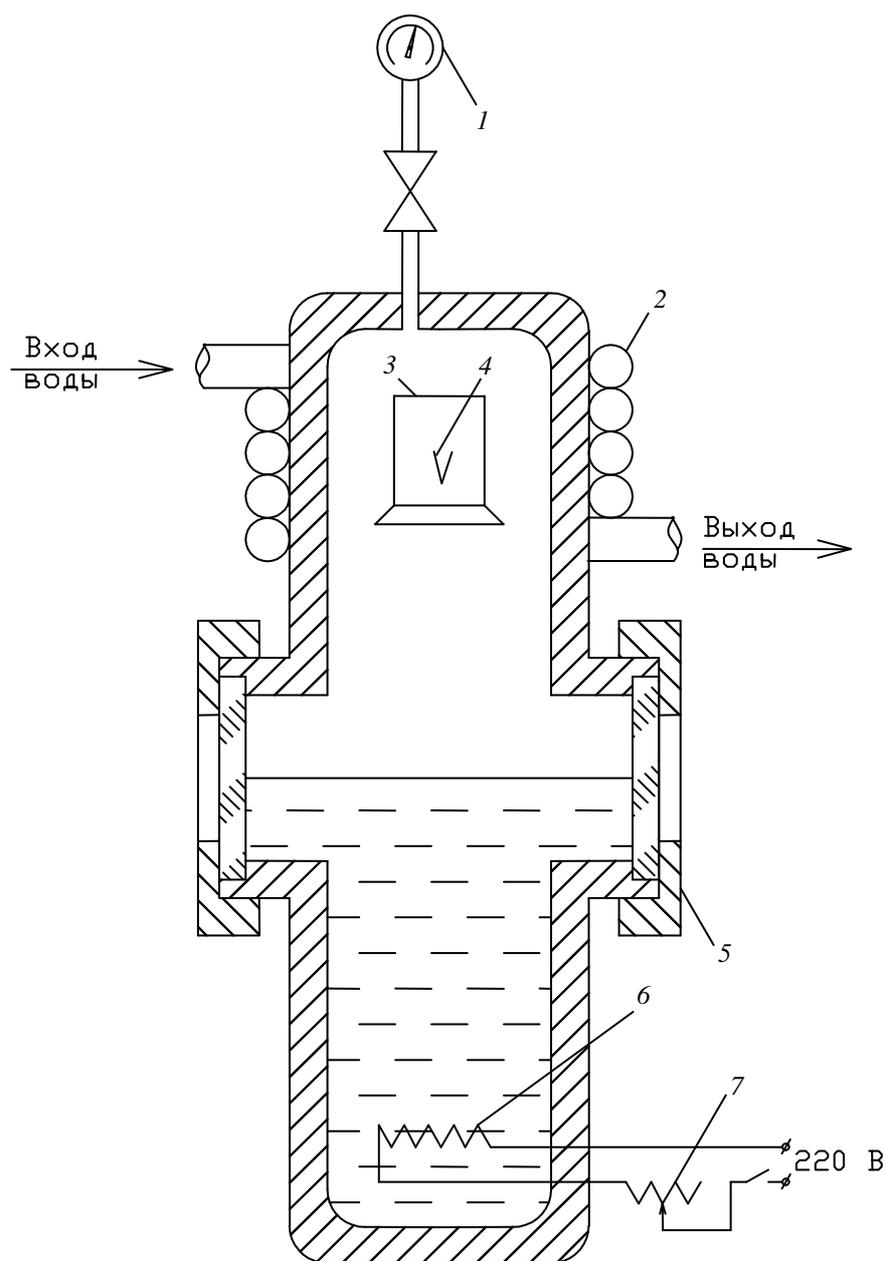


Рис. 2. Схема лабораторной установки:  
 1 – манометр; 2 – змеевик; 3 – экран; 4 – горячий спай;  
 5 – смотровое окно; 6 – электронагреватель; 7 – реостат

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 хладона; 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, в 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);

– записать данные градуировки термпары по градуировочной таблице, имеющейся при установке (см. прил. 2).

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

### Протокол наблюдений

Атмосферное давление  $B =$  мм рт. ст.

№ п/п	Показания приборов	Номер измерения									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Давление по манометру, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )										
2	ЭДС термопары, мВ										

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 оставались 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 этих параметров.

Рабочая зона установки ограничена пределами давления насыщенных паров хладона от 0,4 МПа (что соответствует температуре 8 °С) до 1 МПа (температура пара приблизительно плюс 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 весьма 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 производят 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 обрабатывают таким образом, чтобы наглядно выявить зависимость  $p = f(T_n)$  и сравнить эту опытную зависимость с точными справочными данными, установленными рядом теоретических и экспериментальных научно-исследовательских работ.

Обработку производят 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 прилагают к отчету о выполнении работы). Абсолютное давление рассчитывают с учетом действительного барометрического давления. По ходу обработки результатов расчеты систематизируют в виде таблицы (табл. 2).

**Результаты обработки опытных данных**

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

Полученные опытные данные наносят на КРУПНОМАСШТАБНЫЙ график  $p_{\text{абс}}-T$ , выполняемый на миллиметровке. 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  $p_{\text{табл}}$ , которые заносят в табл. 2. Там же записывают разности  $\Delta p$  между измеренными и справочными значениями давления, т. е. абсолютные погрешности опытных данных. Далее вычисляют и включают в таблицу относительные погрешности  $\delta p$ , полученные в ходе измерений значений давления насыщения.

Среднее отклонение опытных давлений 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  $p = f(T_{\text{н}})$ , о качестве полученных данных и о возможных причинах их отклонения (в том или другом направлении) от действительных.

Полученные опытные данные нужно использовать для расчета теплоты парообразования хладагента R12 при температурах 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 миллиметровойке. В указанных координатах кривую парообразования можно считать в первом приближении прямолинейной. На этот график, кроме опытных точек, наносят критическую точку, параметры которой  $T_{кр}$  и  $p_{кр}$  берут из справочника [2]. Через критическую точку проводят прямую так, чтобы она осредняла опытные данные. Уравнение этой линии

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

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 [2].

## 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.

### *Список литературы*

1. Теоретические основы хладотехники. Часть 1. Термодинамика / Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Изд-во «Колос», 1994. – 288 с.
2. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ. / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, А.В. Куприянова. – СПб.: СПбГАХПТ, 1993. – 309 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ И ДАВЛЕНИЕМ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА

#### 1. Задание

1. Иметь четкое представление о каждом из возможных состояний жидкости и пара (ненасыщенная и насыщенная жидкости; влажный, сухой насыщенный и перегретый пар; критическое состояние). Уяснить физический смысл и взаимосвязь 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 0,3 МПа.

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

#### 2. Основные теоретические понятия

Опытным путем 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 показана на рис. 3. Вправо от кривой расположена область перегретого водяного пара, влево – 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).

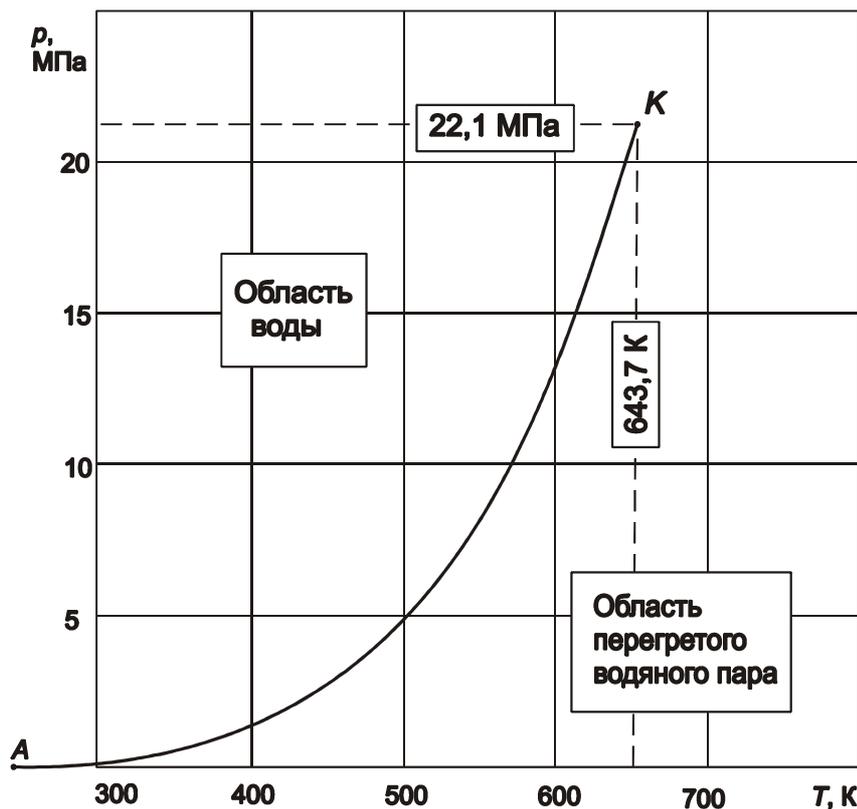


Рис. 3. Диаграмма  $p$ – $T$  для водяного пара

Точка  $K$  называется критической точкой. В сверхкритической области, при значениях параметров, больших  $p_k$  или  $T_k$  (например, для воды при давлении  $p_k > 22,1$  МПа и температуре  $T_k > 647,3$  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 [2].

### 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. 2. Основной частью установки является кипяtilьный аппарат, который представляет собой стальной сосуд, покрытый слоем изоляции и снабженный смотровым окном 5. Кипяtilьник обогревается спиралью электронагревателя 6. Ползунковый реостат 7 обеспечивает регулировку нагрева кипяtilьника; 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 кипяtilьного 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 кипяtilьный аппарат дистиллированной водой, подает ток на электронагреватель, а затем включает воду на конденсатор. Получаемый из воды влажный пар собирается в верхней части цилиндра кипяtilьного 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 и 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;
- ознакомиться с применяемыми в работе измерительными приборами и записать их характеристики в таблицу (прил. 1);
- выписать данные градуировки термопары 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 измерения давления и температуры пара производятся при не вполне стационарных условиях, т. е. при медленном повышении или понижении этих параметров.

Измерения следует вести 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/см<sup>2</sup>) 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 производят следующим образом, при приближении стрелки манометра к очередному делению шкалы заранее записывают значение данного деления; затем, также заранее, нажимают кнопку включения термопары 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 эту 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 систематизируют в таблице.

Далее строят на миллиметровке КРУПНОМАСШТАБНЫЙ график  $p-T_n$ , на который наносят опытные точки и осредненную кривую. На том же графике строят вторую кривую по выписанным из таблиц 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 этой кривой определяют точные значения давлений насыщения для всех опытных температур и включают их в табл. 2. Определяют расхождения  $\Delta p$  между опытными и точными данными справочных значений давления.

Для четырех-пяти опытных значений температур вычисляют относительную ошибку определения давления (в процентах) по формуле

$$\sigma_p = (\Delta p/p_{\text{табл}})100.$$

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, о качестве полученных опытных данных и о возможных причинах отклонения их 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 термомпар 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  $\sigma_p$  и расчеты, связанные с его определением;
- анализ опытных данных и выводы по результатам работы.

### *Список литературы*

1. Теоретические основы хладотехники. Часть 1. Термодинамика /Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Изд-во «Колос», 1994. – 288 с.
2. Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 408 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНТАЛЬПИИ ВОДЯНОГО ПАРА ПРИ ПОМОЩИ АДИАБАТИЧЕСКОГО ДРОССЕЛИРОВАНИЯ

#### 1. Задание

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

2. Провести эксперимент по определению энтальпии перегретого водяного пара. Сравнить полученное значение энтальпии и интегрального эффекта Джоуля–Томпсона 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:

$$h = u + pv.$$

Энтальпию можно представить также 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 процессах парообразования, конденсации и других изобарных процессах.

Энтальпия является одной из важнейших калорических 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 этого 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. 4. Установка работает на водяном паре, поступающем из парогенератора 14. Постоянное давление пара, подаваемого в установку, обеспечивается с помощью контактного манометра. Перегрев пара осуществляется в электрическом пароперегревателе 13, откуда пар поступает в первую измерительную камеру 5.

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 6, где и происходит его дросселирование до давления, близкого к атмосферному. После вентиля пар проходит во вторую измерительную камеру 8, 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.

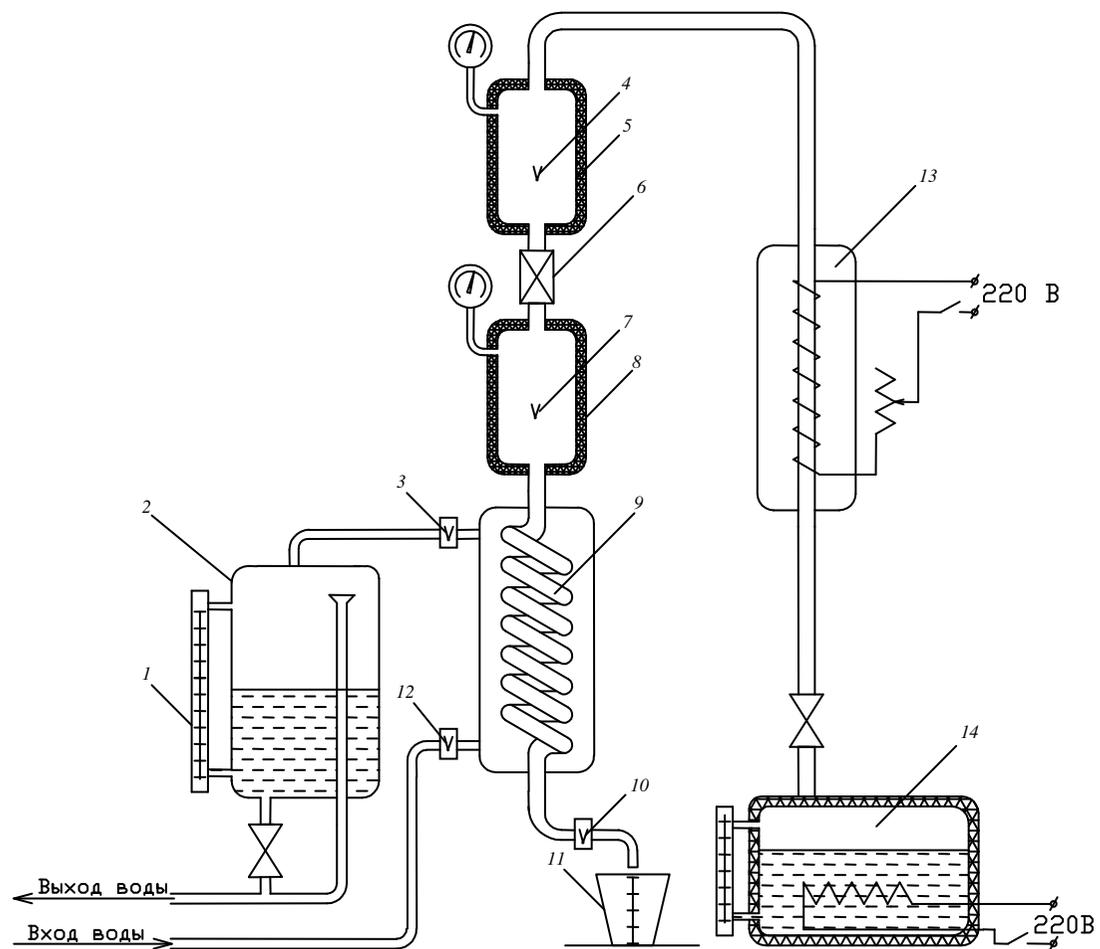


Рис. 4. Схема лабораторной установки:

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

Из второй измерительной камеры пар поступает в конденсатор-калориметр 9, где охлаждается и конденсируется. Образовавшийся конденсат сливается в мерный сосуд 11. Температура конденсата на выходе  $t_k$  измеряется с помощью термометра 10. Теплота, отдаваемая паром при охлаждении и конденсации, воспринимается точной водопроводной водой. Ее расход может быть определен с помощью мерного бака 2, снабженного водомерным стеклом 1. Шкала водомерного стекла отградуирована в литрах.

Температура воды на входе и выходе из конденсатора-калориметра измеряется с помощью термометров 3 и 12. 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 2. В этот же момент записывают время, соответствующее началу сбора конденсата и охлаждающей воды. Сбор рекомендуется вести 10–15 мин. По истечении намеченного времени необходимо убрать мерный сосуд 0из 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  $p_1, p_2, t_1, t_2, t_k, t_{вх}, t_{вых}$ , заносая результаты измерений в протокол наблюдений (табл. 3).

Таблица 3

### Протокол наблюдений

Атмосферное давление  $B =$  мм рт. ст.

Время проведения опыта	Объем охлаждающей воды в баке, л	Объем собранного конденсата, л	№ измерения	Показания манометра, дел. (кгс/см <sup>2</sup> .)		ЭДС термопар, мВ				
				$p_1$	$p_2$	Измерительные камеры		Охлаждающая вода		Конденсат
						$t_1$	$t_2$	$t_{вх}$	$t_{вых}$	
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 температур 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  $q$  – удельное количество теплоты, отведенной от пара, кДж/кг;  $h_2$  – 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.

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

$$q = \frac{M_{\text{в}} c_{\text{pm}} (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}})}{M_{\text{к}}}.$$

Энтальпия  $h_k$  конденсата может быть рассчитана по формуле

$$h_k = c_{\text{pm}} t_k.$$

где  $c_{\text{pm}}$  – 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 [2], 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 состояниям 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–Томпсона  $\Delta t = t_2 - t_1$  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 1, 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 эффект Джоуля–Томпсона также следует рассчитывать, используя интерполяцию табличных данных по термодинамическим свойствам перегретого водяного пара [2].

## 6. Отчет о работе

Отчет о работе должен содержать:

- принципиальную схему установки;
- протокол наблюдения;
- расчеты, связанные с определением  $h_1$ ;
- табличные значения энтальпии (определенные 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 сравнение его 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.

### *Список литературы*

1. Теоретические основы хладотехники. Часть 1. Термодинамика / Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Изд-во «Колос», 1994. – 288 с.
2. Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 408 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ СУХОСТИ ВЛАЖНОГО НАСЫЩЕННОГО ПАРА

#### 1. Задание

1. Иметь 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). Эта 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 параметры его определяются расчетом.

Так, энтальпия влажного пара (Дж/кг) 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 изображена на рис. 5. Образовавшийся в электрическом парогенераторе 6 водяной пар поступает в пароперегреватель 4. 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 теплотерь электро-спираль 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 3 поступает в конденсатор 2. 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 1.

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

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

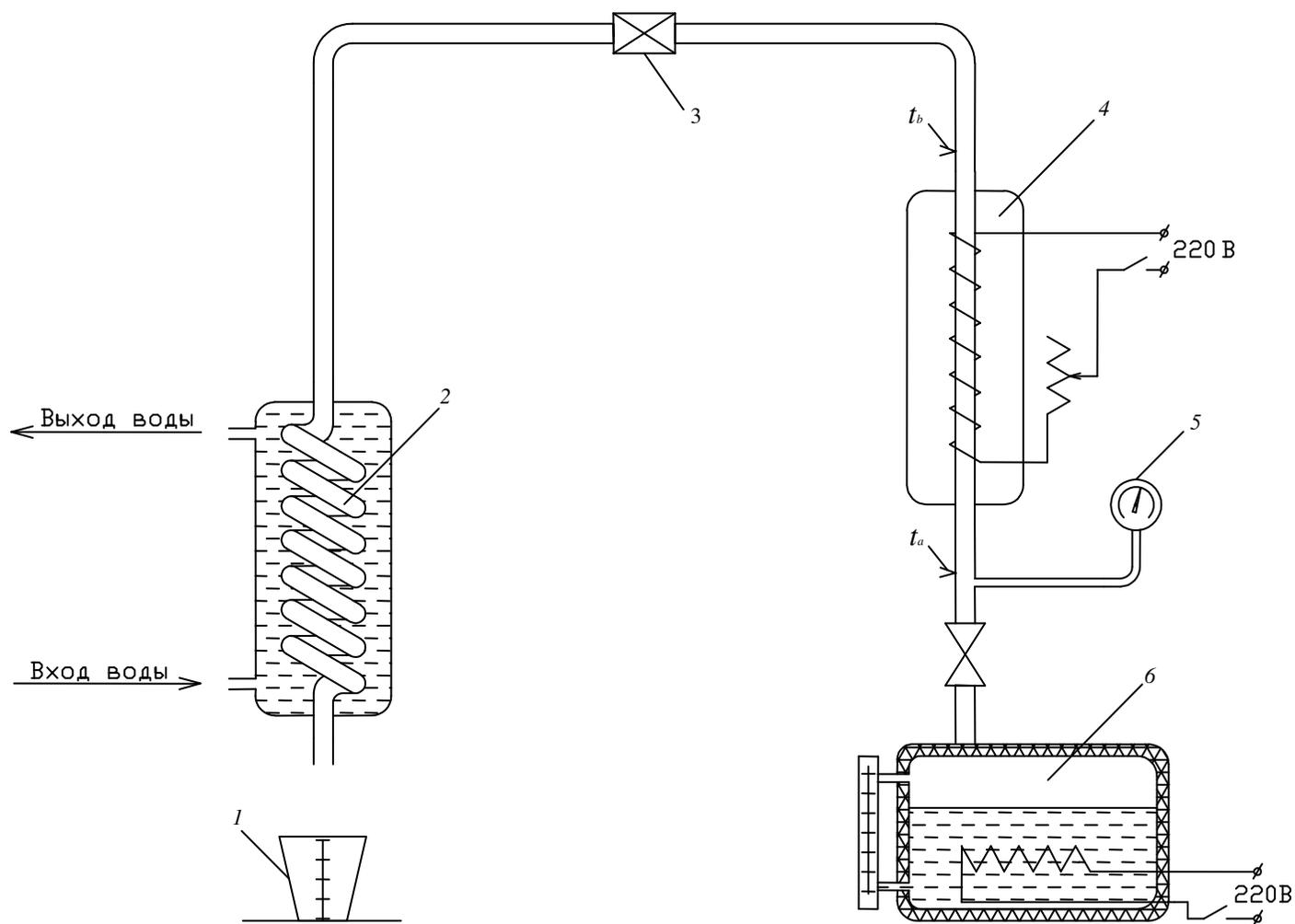


Рис. 5. Схема лабораторной установки:  
 1 – мерный сосуд; 2 – конденсатор; 3 – вентиль; 4 – пароперегреватель; 5 – манометр; 6 – парогенератор

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 5.

#### 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 в табл. 4.

Таблица 4

#### Протокол наблюдений

Атмосферное давление  $B =$  кгс/см<sup>2</sup>

№ измерения	Показание манометра, кгс/см <sup>2</sup>	$Q_w$ , Вт	ЭДС термопар, мВ		$M$ , кг	$\tau$ , 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, температуру  $t_b$  – термопарой, мощность грелки  $Q_w$  – ваттметром и продолжительность опыта  $\tau$ . Температура  $t_a$  может быть измерена термопарой, а также найдена по таблицам паров на основании показаний манометра.

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  $l$ , 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 находят температуру  $t_b$  по среднему значению ЭДС термопары.

Температуру  $t_a$  также определяют по среднему значению ЭДС соответствующей термопары. Для контроля эту температуру находят и по таблицам насыщенных паров [2] по величине давления  $p_{\text{абс}}$ .

Степень сухости пара, поступающего в пароперегреватель, может быть определена следующим образом. Энтальпия пара (кДж/кг) 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 табл. 5.

Таблица 5

#### Результаты обработки опытных данных

№ опы- та	$p$ , 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	$h_a$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$r_a$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$x_a$

## 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 термомпар;
- результаты обработки опытных данных и таблицу расчетных данных;
- изображение всех процессов, происходящих на установке в  $T-s$  и  $h-s$  диаграммах.

### *Список литературы*

1. Теоретические основы хладотехники. Часть 1. Термодинамика / Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Изд-во «Колос», 1994. – 288 с.
2. **Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А.** Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 408 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ХЛАДОНОВ

#### 1. Задание

1. Иметь 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 хладона С318 при одной температуре. Сравнить полученное значение теплоты парообразования с табличными данными и определить погрешность.

#### 2. Основные теоретические понятия

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 (давления насыщения). Эта зависимость имеет сложный характер и выражается кривой линией. 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 значений внутренней энергии 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 от соответствующего ей давления насыщения. По мере их 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 0 °С весьма различны для разных жидкостей, кДж/кг:

вода .....	2501,0
аммиак .....	1261,5
хладон 12 .....	152,1
хладон 22 .....	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 установки показано на рис. 6. Основными ее элементами являются хладоновый парогенератор 7 и конденсатор 11, которые соединены трубками с вентилями 6 и 10.

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 8, обеспечивающий подвод теплоты к кипящему хладону. В верхней части парогенератора установлен лабиринтный отделитель капель жидкости, препятствующий их уносу в магистраль. Температуру жидкого кипящего хладона и его пара определяют с помощью термопар, горячие спаи которых введены внутрь парогенератора. Давление хладона измеряется манометром 9, 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 10 закрыт. Уровень конденсата и его объем могут быть установлены с помощью специальной шкалы. Вентиль 10 открывают для перепуска (переливания) жидкого хладагента из конденсатора в парогенератор (эту процедуру выполняет лаборант после окончания серии опытов).

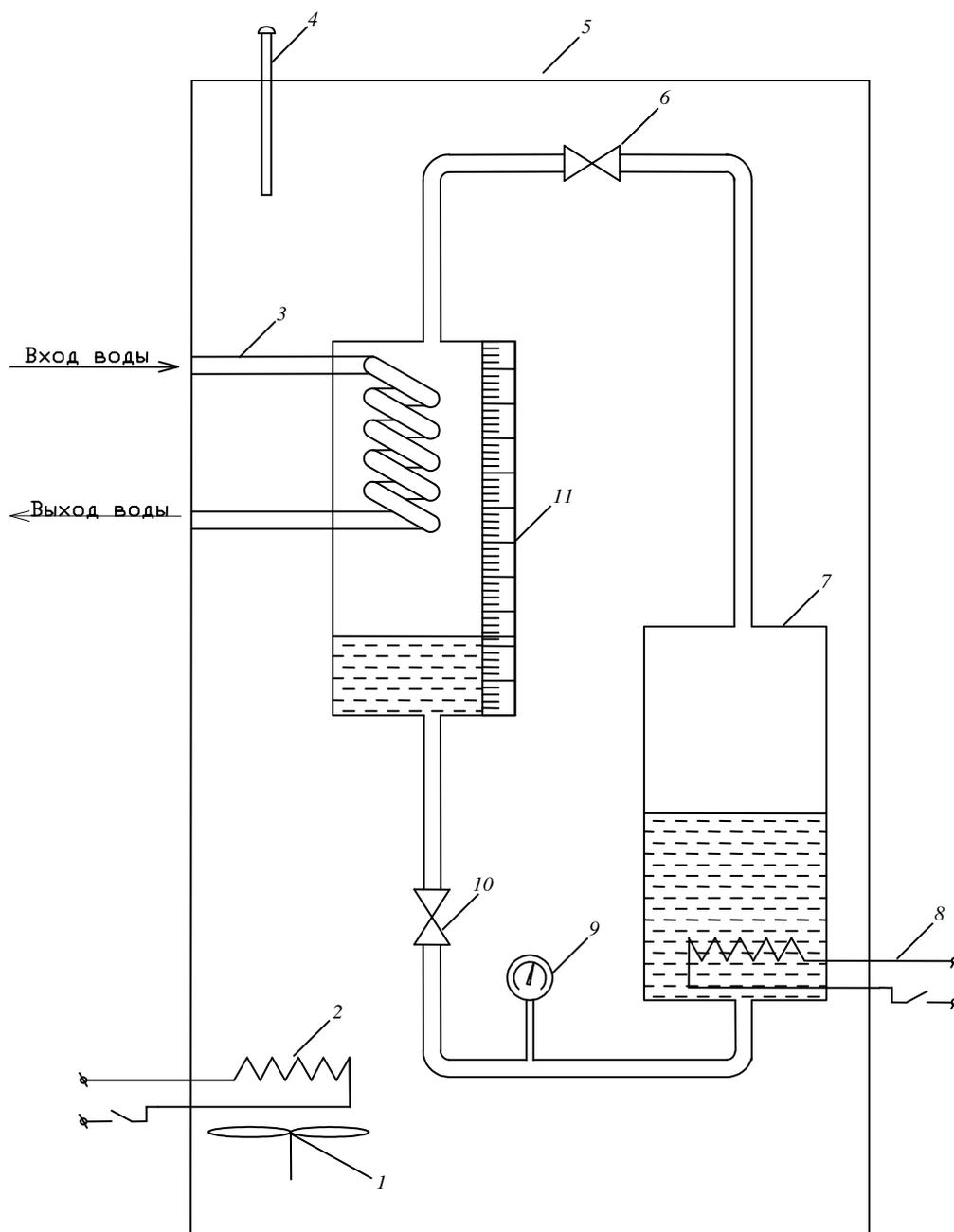


Рис. 6. Схема лабораторной установки:

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

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 хладонем и оставшегося свободного пространства недостаточно для проведения опыта, то необходимо с помощью лаборанта перепустить жидкий хладон 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 (табл. 6).

### Протокол наблюдений

Объем жидкого хладагента, см <sup>3</sup>		№ измерения	ЭДС термопар, мВ			Мощность нагревателя, Вт	Избыточное давление в парогенераторе, кгс/см <sup>2</sup>
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;  $\tau$  – продолжительность процесса парообразования, с;  $M$  – масса сконденсировавшегося за это время хладона, кг.

Масса хладона 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 хладона 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 хладона;
- анализ опытных данных и выводы по результатам работы.

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

### *Список литературы*

1. Теоретические основы хладотехники. Часть 1. Термодинамика / Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Изд-во «Колос», 1994. – 288 с.
2. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ. / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, А.В. Куприянова. – СПб.: СПбГАХПТ, 1993. – 309 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АДИАБАТНОГО ИСТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ СУЖИВАЮЩЕЕСЯ СОПЛО

#### 1. Задание

1. Иметь 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

$$w_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1 \left[ 1 - (p_2 / p_1)^{(k-1)/k} \right]}, \quad (1)$$

где  $k$  – показатель адиабаты;  $v_1$  – удельный объем газа перед соплом, м<sup>3</sup>/кг;  $p_1, p_2$  – давление газа до и после сопла, Па.

Анализируя формулу (1) для  $w_2$ , можно было бы предположить, что при изменении  $\beta$  от 1 до 0 происходит непрерывное увеличение скорости газа. Однако опытным путем установлено, что в этом случае скорость газа растет лишь до некоторого значения, называемого критической скоростью и обозначаемого  $w_{2кр}$ . Критическая скорость истечения равняется 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  $\beta_{кр} = 0,528$ .

Очевидно, что для определения максимального значения скорости газа может быть использована формула (1) после подстановки в нее приведенного выше выражения для  $\beta_{кр}$ . Формула приобретает вид

$$w_{2кр} = \sqrt{2kp_1 v_1 / (k+1)}. \quad (2)$$

### 3. Лабораторная установка

Схема установки изображена на рис. 7. Воздух забирается из помещения компрессором 3, сжимается им до давления 0,3–0,4 МПа (3–4 бар) и подается в ресивер 1. 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  $p_1$ . Это давление измеряется с помощью образцового манометра 4. Воздух с давлением  $p_1$  заполняет камеру 5 и через суживающееся сопло 6 истекает в камеру 7, где поддерживается более низкое давление  $p_2$ , измеряемое с помощью образцового манометра 9. Давление  $p_2$  в камере 7 может изменяться

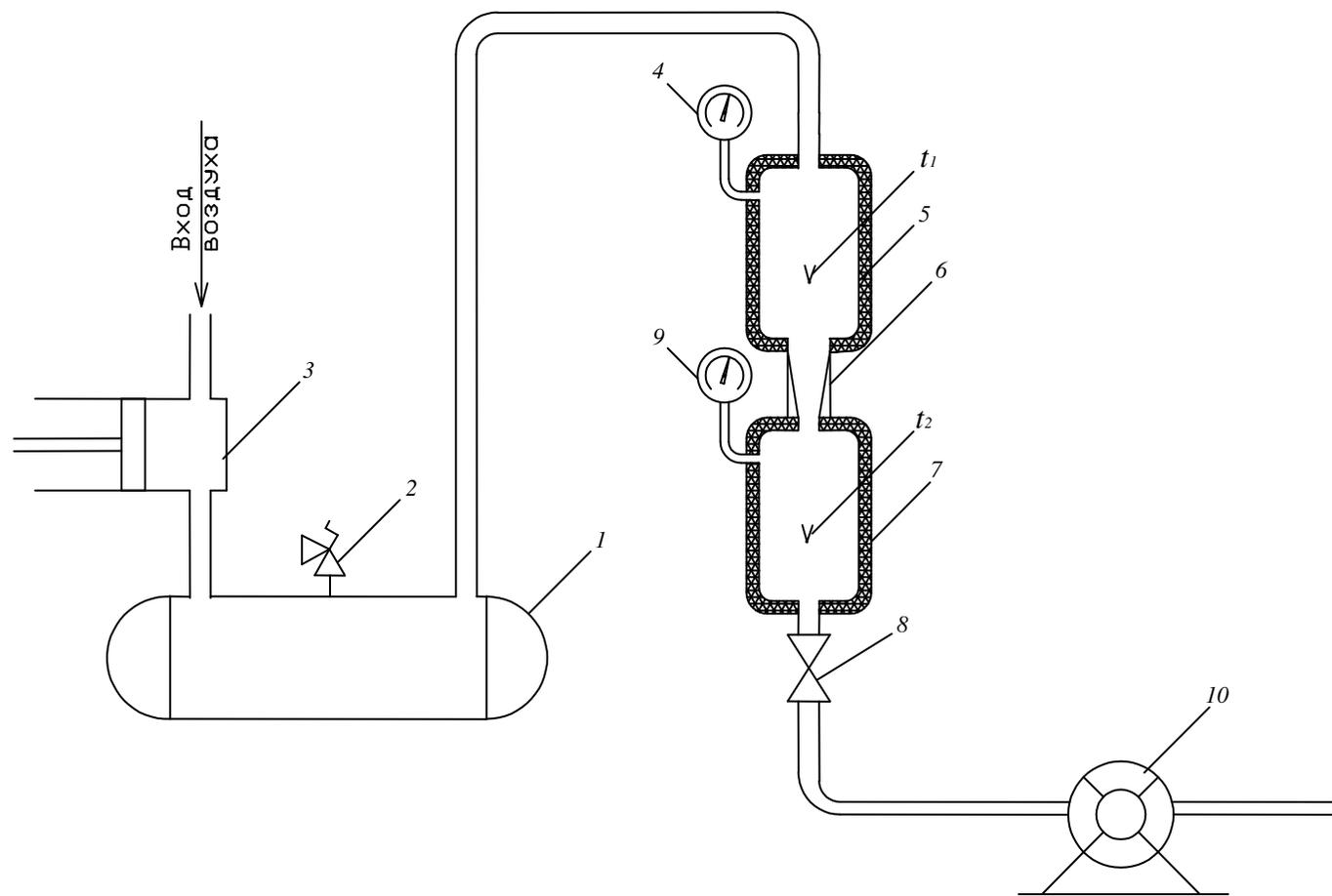


Рис. 7. Схема лабораторной установки:  
 1 – ресивер; 2 – пружинный клапан; 3 – компрессор; 4, 9 – манометры;  
 5, 7 – камеры; 6 – суживающееся сопло; 8 – вентиль; 10 – счетчик (расходомер)

с помощью вентиля 8. Открывая этот вентиль и облегчая воздуху выход из камеры 7 в помещение, можно понизить давление  $p_2$ , закрывая – повысить.

Объемный расход воздуха определяют с помощью объемного расходомера или газового счетчика.

#### 4. Выполнение работы

Пуск компрессора осуществляется студентами только в присутствии лаборанта. С помощью клапана устанавливают 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 7. Первое значение при самом малом открытии вентиля должно отличаться от значений  $p_1$  приблизительно на 0,05 МПа. Так, если в камере 5 установлено давление  $p_{1изб} = 0,27$  МПа, то первое значение  $p_{2изб}$  должно равняться 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.

Температуру воздуха  $T_1$  в камере 5 и температуру  $T_2$  в камере 7 измеряют термомпарами.

Затем производят аналогичные измерения при других, уменьшающихся значениях  $p_2$  (соответственно и  $\beta$ ). Понижение давления  $p_2$  в камере 7 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. Результаты измерений заносят в протокол наблюдений (табл. 7).

Таблица 7

#### Протокол наблюдений

Атмосферное давление  $B =$  мм рт. ст.

№ измерения	$p_1$ , кг/см <sup>2</sup>	$p_2$ , кг/см <sup>2</sup>	ЭДС термопар, мВ		Отрезок времени при измерении $\tau$ , с	Показания расходомера $V$ , м <sup>3</sup> /с или счетчика, м <sup>3</sup>
			До сопла	После сопла		
1						

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  $\beta$ , равных 1; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5 и 0,4. Для расчета максимального значения скорости  $w_{2кр}$  используют формулу (2). По этим данным строят на миллиметровке 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  $\beta$  ( $\beta_1 > \beta_{кр}$  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. 8).

**Опытные и расчетные данные**

№ опыта	$p_{1абс},$ МПа	$p_{2абс},$ МПа	$\beta_{оп}$	$T_1,$ К	$T_2,$ К	$w_2$ по формуле (3), м/с	$\beta$	$w_2$ по формулам (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 (сняты-ми с графика);
- характеристику приборов;
- анализ опытных данных и выводы по результатам работы.

*Список литературы*

1. Теоретические основы хладотехники. Часть 1. Термодинамика / Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Изд-во «Колос», 1994. – 288 с.
2. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ. / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, А.В. Куприянова. – СПб.: СПбГАХПТ, 1993. – 309 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ДАВЛЕНИЕМ И ОБЪЕМОМ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ СЖАТИЯ ИЛИ РАСШИРЕНИЯ ХЛАДАГЕНТА R13

#### 1. Задание

1. Уяснить физическую картину паровых термодинамических процессов.

2. Провести опыт по изотермическому сжатию хладагента R13 при некоторой температуре, меньшей критической; построить на миллиметровке по справочным данным пограничные кривые и изотерму  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  в координатах  $p-v$ . Нанести на тот же график результаты обработки опытных данных.

3. Сравнить удельные объемы насыщенной жидкости и сухого насыщенного пара, зафиксированные в опыте, с табличными данными при температуре опыта и вычислить относительную погрешность опыта.

#### 2. Основные теоретические понятия

Уравнение состояния Клапейрона–Менделеева справедливо только для идеальных газов, т. е. газов, в которых отсутствуют силы межмолекулярного взаимодействия, а объем, занимаемый молекулами, равен нулю. В природе таких газов нет. Поведение всех существующих реальных газов отклоняется в большей или меньшей мере от поведения идеальных газов.

Все газы можно рассматривать как сильно перегретые пары, которые при охлаждении ниже критической температуры при одновременном сжатии переходят в жидкое состояние. Чем больше давление и чем ниже температура газа, тем ближе он к началу сжижения и тем больше отклоняется от идеального состояния.

Рассмотрим изображение процессов изотермического сжатия реального газа на  $p-v$  диаграмме (рис. 8) при температурах ниже и выше критической. Изотермы для температур, меньших критической ( $d'c'b'a'$ ,  $d''c''b''a''$  и т. д.), состоит из трех участков: кривой, близкой к изотерме идеального газа, имеющей характер гиперболы,  $d'c'$ ; горизонтального участка двухфазного состояния  $c'b'$  (в области влажного пара) и изотермы жидкости  $b'a'$ .

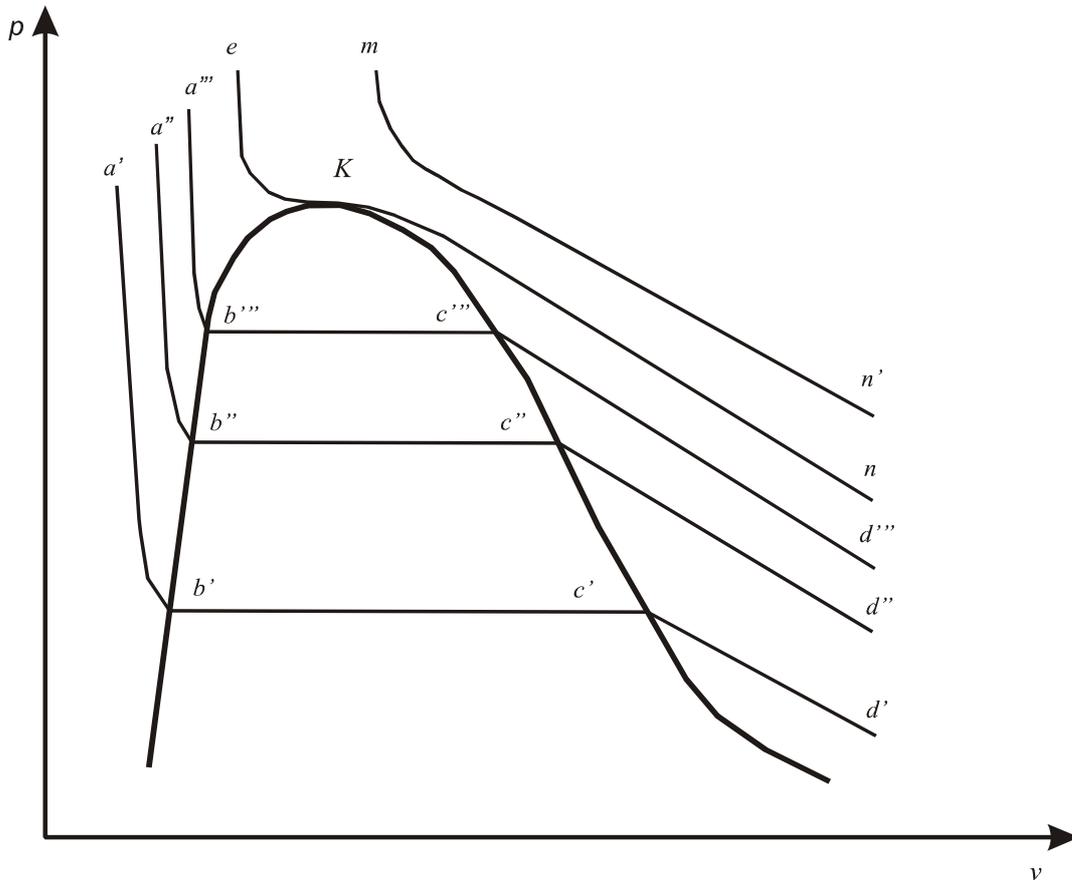


Рис. 8. Диаграмма  $p-v$  для хладагента R13

Чтобы процесс сжатия осуществлялся как изотермический, уменьшение объема газа должно сопровождаться отводом теплоты (иначе затрачиваемая на сжатие внешняя работа вызовет повышение внутренней энергии и температуры газа). Протекающий в обратном направлении процесс изотермического расширения требует для своего осуществления подвода теплоты к хладагенту.

При изотермическом сжатии перегретого пара  $d'c'$  в результате уменьшения объема с одновременным отводом теплоты давление газа возрастает до давления насыщения, затем происходит постепенное превращение сухого насыщенного пара в насыщенную жидкость (процесс конденсации  $c'b'$ ). Для этого процесса характерно то, что постоянной температуре соответствует постоянное давление конденсации.

В момент, когда весь пар превратится в насыщенную жидкость, дальнейшее сжатие сопровождается резким повышением давления, так как жидкости практически несжимаемы ( $b'a'$ ).

При изотермическом расширении ненасыщенной жидкости те же процессы протекают в обратном направлении: ненасыщенная

жидкость в результате подвода теплоты несколько увеличивает свой объем, при этом давление ее резко падает до давления насыщения ( $a'b'$ ) и начинается превращение насыщенной жидкости в сухой насыщенный пар (процесс кипения  $b'c'$ ), для которого характерна определенная зависимость между постоянной температурой и постоянным давлением насыщения.

При дальнейшем подводе теплоты сухой насыщенный пар превращается в перегретый; в области перегретого пара увеличение объема при постоянной температуре сопровождается понижением давления ( $c'd'$ ).

С повышением температуры точки начала ( $c'$ ,  $c''$ ,  $c'''$  и т. д.) и конца ( $b'$ ,  $b''$ ,  $b'''$  и т. д.) конденсации сближаются, т. е. горизонтальные участки становятся все более и более короткими и при температуре, называемой критической, линия конденсации исчезает совсем. Это значит, что при критической температуре переход из газообразного состояния в жидкое происходит без изменения объема, поэтому оба агрегатных состояния при этих условиях являются идентичными.

Изотерма сжатия для критической температуры ( $nKl$ ) не имеет горизонтального участка, а имеет перегиб в точке  $K$  так, что касательная в точке перегиба будет горизонтальной.

Область диаграммы, ограниченная пограничными кривыми пара ( $K, c''', c'', c'$ ) и жидкости ( $K, b''', b'', b'$ ), является областью двухфазных состояний, или областью влажного пара. Область диаграммы вправо от пограничной кривой пара при  $v > v_{кр}$  считается областью перегретого пара и газа.

Критическая точка  $K$  лежит на границе трех состояний: перегретого пара, влажного пара и жидкости. Таким образом, можно сделать заключение, что сжижение газа (или перегретого пара) путем одного сжатия возможно только при температурах ниже критической, так как только при этих условиях изотермы проходят в области конденсации пара.

При температурах выше критической газ (или перегретый пар) никаким повышением давления не может быть скачкообразно переведен в жидкое состояние.

### 3. Лабораторная установка

В связи с невозможностью использования ртути в учебной лабораторной работе запланировано выполнение этой работы в виртуальном варианте на ЭВМ. При этом схема стенда и ход лабораторной работы остаются без изменений.

Установка (рис. 9) состоит из стеклянного мерного сосуда 4, помещаемого в металлический резервуар 8, пресса 7, манометра 6, термодпары 5.

Мерный сосуд 4 – это толстостенный стеклянный цилиндр переменного сечения, оканчивающийся в верхней части капиллярной трубкой с запаянным концом; нижний конец цилиндра открыт.

Резервуар 8 представляет собой прочный металлический баллон, в верхней части которого с помощью фланцевого соединения прикрепляются крышка и прозрачный стеклянный колпак 2.

Мерный сосуд, предварительно заполненный точно измеренным количеством газообразного хладагента R13, помещается в вертикальном положении (открытым концом вниз) в резервуар, предварительно залитый ртутью, таким образом, чтобы открытый конец сосуда всегда находился ниже уровня ртути. Капиллярная трубка сосуда выводится наружу через уплотненное отверстие в крышке. Сборка прибора завершается установкой прозрачного колпака 2, герметично закрепляемого на резервуаре фланцевым соединением. После этого через пресс происходит заполнение машинным маслом верхней части резервуара и соединительных труб. Сам пресс также заполняется маслом (эти операции выполняются лаборантом до начала занятий).

Сжатие хладагента R13 осуществляется прессом. При увеличении давления на масло последнее вытесняет часть ртути в мерный сосуд. Ртуть, действуя как поршень, сжимает хладагент R13. Изменение высоты столба хладагента R13 в капиллярной трубе сосуда регистрируется с помощью шкалы 3, освещаемой специальной подсветкой. Через колпак 2, играющий роль термостата, циркулирует вода с постоянной температурой из термостата 1. Температура воды измеряется с помощью термодпары 5, подключенной к цифровому милливольтметру. Таблица градуировки термодпары имеется в лаборатории.

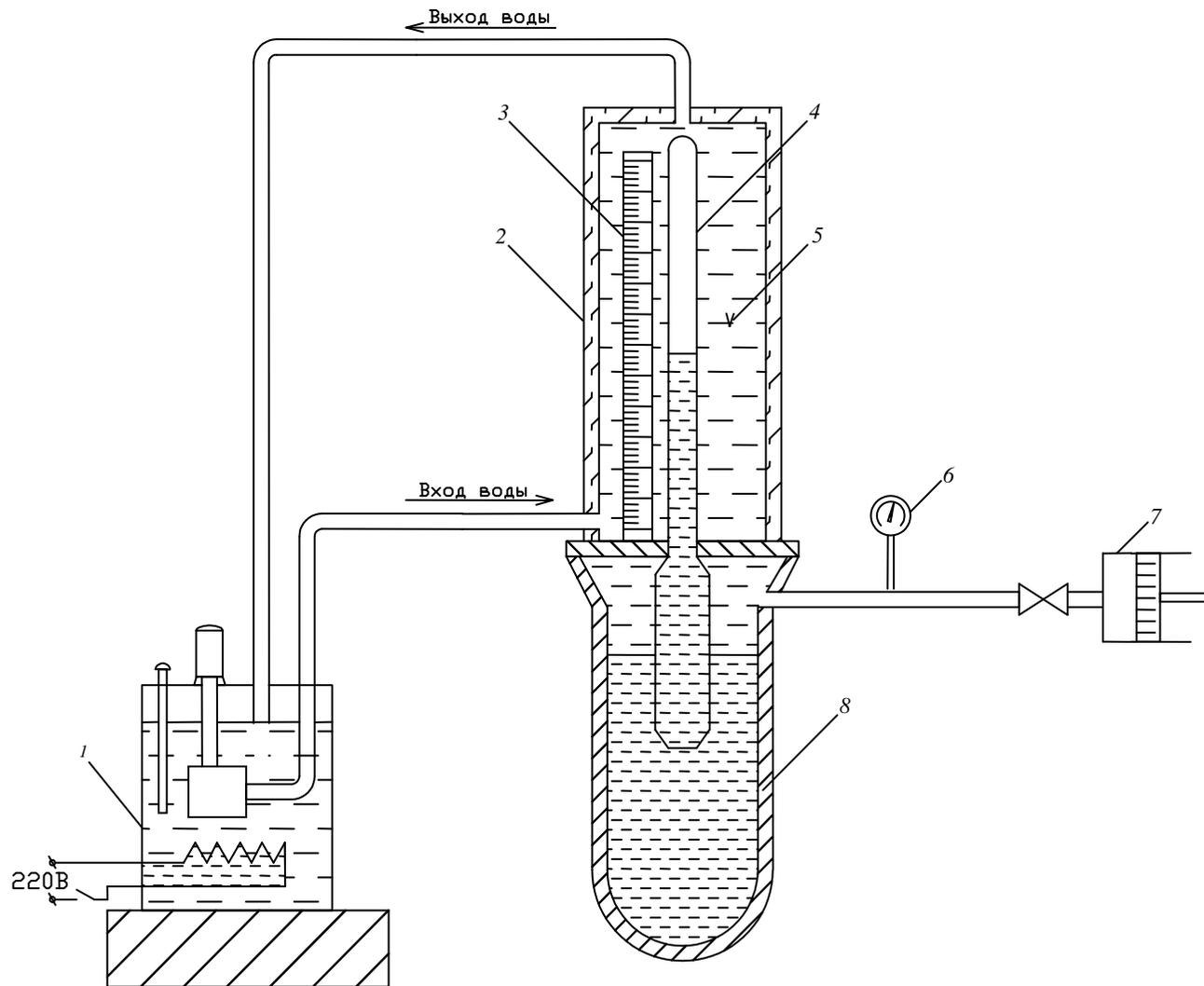


Рис. 9. Схема лабораторной установки:

1 – термостат; 2 – колпак; 3 – шкала; 4 – мерный сосуд; 5 – термопара; 6 – манометр; 7 – пресс; 8 – металлический резервуар

#### 4. Выполнение работы

После изучения теоретического материала и детального ознакомления с установкой можно приступить к выполнению опыта, предварительно заготовив протокол наблюдений.

Выполнять опыт рекомендуется в такой последовательности:

- включить подсветку;
- перемещая поршень влево (ввинчивая винт пресса), производить наблюдение за процессом сжатия хладагента R13 в капилляре и измерение давления и объема в нем.

В результате опытов выявляется зависимость  $p = f(v)$  хладагента R13, находящегося в капилляре. Давление измеряется манометром. Изменение объема хладагента фиксируется по положению мениска ртути в капилляре. Первые измерения давления и объема производят при появлении ртутного мениска. Очевидно, что изменение объема хладагента в ходе опыта пропорционально изменению высоты его столба в капилляре.

При выполнении опыта изменять давление нужно очень медленно, записывая показания манометра и соответствующие им значения высоты столба хладагента R13.

При проведении опыта необходимо, кроме того, тщательно наблюдать за поведением хладона в капилляре при изменении давления, чтобы своевременно зафиксировать начало насыщения и соответствующие этому моменту параметры.

Как известно, для чистых веществ в течение всего периода конденсации (или кипения) при постоянной температуре, равной температуре насыщения, давление остается постоянным. По окончании процесса конденсации давление возрастает при почти неизменном объеме, так как жидкость практически несжимаема.

Давление следует повышать до 8 МПа (около 80 атм). После достижения заданного давления необходимо провести процесс расширения хладона и сделать соответствующие записи в журнале наблюдений.

**ПРЕВЫШЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ 8 МПа НЕДОПУСТИМО**, так как при этом может произойти разрушение капилляра.

Результаты наблюдений заносят в протокол наблюдений (табл. 9).

**Протокол наблюдений**Атмосферное давление  $B =$  мм рт. ст.

№ измерения	ЭДС термопары, мВ	Показания манометра, кгс/см <sup>2</sup>	Высота столба хладона, мм	Примечание

**5. Обработка результатов опыта**

По окончании измерений полученные результаты обрабатывают так, чтобы построить зависимость  $p = f(v)$  для изотермического процесса.

Расчет выполняют в следующем порядке:

– определяют температуру воды в термостате с помощью таблиц градуировки термопары;

– рассчитывают абсолютное давление и удельный объем для каждого из состояний хладона.

Удельный объем определяют по известной формуле

$$v = V/M,$$

где  $V = \pi d^2 H/4$ , здесь  $H$  – высота столба хладона, м;  $d$  – внутренний диаметр капилляра, м;

– на миллиметровке по справочным данным для хладона R13 в координатах  $p-v$  строят пограничные кривые в диапазоне температур от 10 °С до критической и изотерму 20 °С в однофазной и двухфазной областях параметров состояния. На этот же график наносят результаты обработки опытных данных (табл. 10).

**Результаты обработки опытных данных**

Температура газа $t$ , °С	Давление газа $p$ , МПа	Удельный объем газа $v$ , м <sup>3</sup> /кг	Примечание

## 6. Отчет о работе

После проведения измерений и выполнения расчетов составляют отчет, в котором приводят:

- схему установки;
- характеристику измерительных приборов, применяемых в работе;
- протокол наблюдений, подписанный лаборантом;
- результаты обработки опытных данных и сводную таблицу;
- график зависимости  $p-v$  при  $t = \text{const}$ ;
- сравнение удельных объемов насыщенной жидкости и сухого насыщенного пара, полученных в опыте, с табличными данными при температуре опыта;
- анализ опытных данных и выводы по результатам работы.

### *Список литературы*

1. Теоретические основы хладотехники. Часть 1. Термодинамика / Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Изд-во «Колос», 1994. – 288 с.
2. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ. / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, А.В. Куприянова. – СПб.: СПбГАХПТ, 1993. – 309 с.

## 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 очень большую роль в теории термодинамики. Так, 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, определяется она 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 методом масса газа в калориметре обычно невелика и при подведении теплоты большая часть ее 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. 10. 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 2 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 4, а повышение температуры  $\Delta t$  – многоспайной дифференциальной термопарой 1.

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 напряжение разбаланса, величина которого зависит от расхода газа.

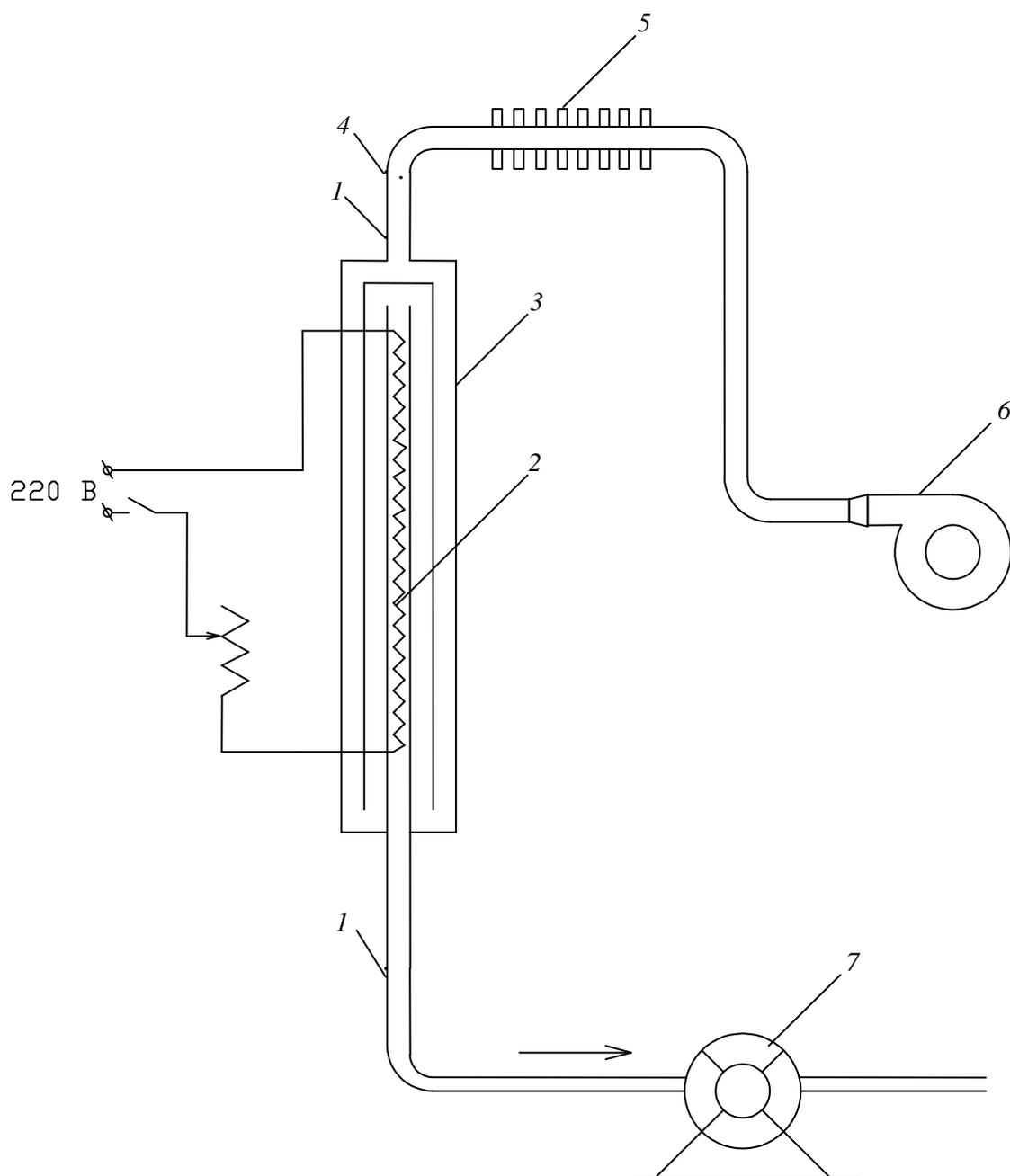


Рис. 10. Схема лабораторной установки:  
 1 – термопара; 2 – электрический нагреватель; 3 – калориметр; 4 – термопара;  
 5 – теплообменник-радиатор; 6 – вентилятор; 7 – расходомер

#### 4. Выполнение работы

Нагреватель калориметра включается только после включения вентилятора. Стационарный тепловой режим в калориметре устанавливается через 10–15 мин. Так как при этом все-таки возможны небольшие колебания расхода воздуха и мощности электронагревателя, необходимо произвести не менее пяти измерений напряжения  $\Delta u$  разбаланса 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 табл. 11.

Таблица 11

##### Протокол наблюдений

Атмосферное давление  $B =$  мм рт. ст.

№ измерения	$\Delta u$ , 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  $M_B$ . По данным градуировки термопар определяют значения  $t_{вх}$  и  $\Delta t$ .

Значение  $c_p$  изобарной теплоемкости воздуха рассчитывают по формуле

$$c_p = Q_{эл} / M_B \Delta t.$$

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 термомпар;
- протокол наблюдений;
- результаты обработки опытных данных;
- сравнение опытного значения теплоемкости с табличным;
- анализ опытных данных и выводы по результатам работы.

### *Список литературы*

1. Теоретические основы хладотехники. Часть 1. Термодинамика / Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Изд-во «Колос», 1994. – 288 с.

2. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ. / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, А.В. Куприянова. – СПб.: СПбГАХПТ, 1993. – 309 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛА ПАРОВОЙ КОМПРЕССОРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

#### 1. Задание

1. Ознакомиться с устройством малой хладоновой холодильной машины.
2. Провести непосредственное наблюдение за процессом кипения хладона 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 этих 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 этих затрат холодильные машины можно разделить на три группы: компрессорные, пароэжекторные и 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 хладоновой компрессорной холодильной машины марки ВН-0,55. Схема установки показана на рис. 11. Компрессор 9 со встроенным и герметизированным электродвигателем засасывает пар хладагента R12 из испарителя, 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 фильтр-осушитель 10 поступает к регулирующему вентилю 7. После дросселирования влажный пар хладона 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 хладоносителем. Для того чтобы наблюдать за процессом кипения хладона в испарителе, несколько его звеньев выполнены из стеклянных трубок. Теплота, необходимая для кипения хладона, отнимается от хладоносителя, температура которого понижается на 5–10 °С.

Теплый хладоноситель из термостата, имитирующего охлаждаемое помещение, поступает в испаритель по трубке 6. Охлажденный хладоноситель сливается через трубку 8 обратно в термостат. Циркуляция хладоносителя осуществляется с помощью погруженного центробежного насоса 4, находящегося в термостате. Хладоноситель подогревается электронагревателем 1 до постоянной температуры  $t_{s1}$ . Эта 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 (хладоносителя), и передается на более высокий температурный уровень (воздуху помещения).

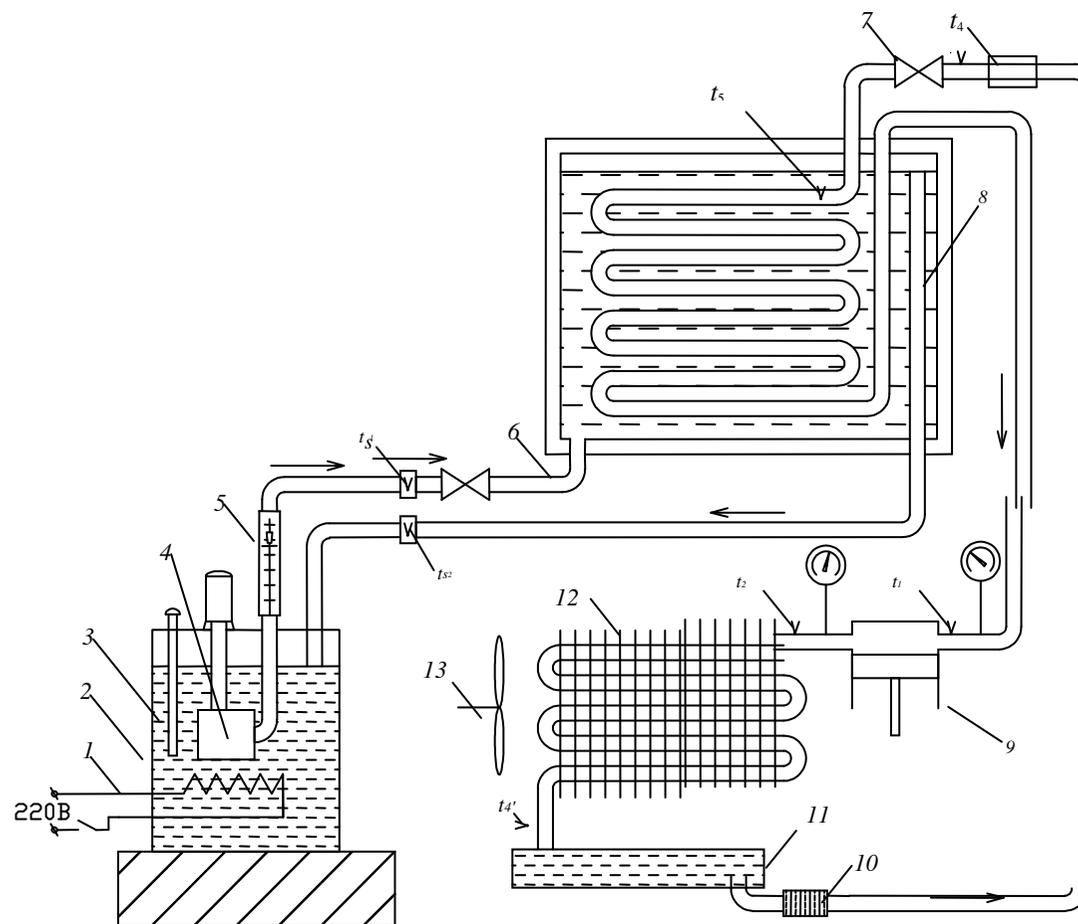


Рис. 11. Схема лабораторной установки:

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

#### 4. Выполнение работы

В ходе опыта измеряют следующие величины: давление хладона в испарителе  $p_0$  и конденсаторе  $p$  – с помощью двух образцовых манометров, расположенных на щите установки; температуру хладонотенителя на входе в резервуар испарителя  $t_{s1}$  и на выходе из него  $t_{s2}$  – с помощью термопар; температуру хладона на входе в компрессор  $t_1$ , на выходе из компрессора  $t_2$ , на выходе из конденсатора (насыщенная жидкость)  $t_{4'}$ , перед регулирующим вентилем (ненасыщенная жидкость)  $t_4$ , в испарителе (влажный пар)  $t_5$  – с помощью медь-константановых термопар.

Один из спаев каждой термопары заключен в запаянную стальную иглу и введен в место измерения в трубку хладонного контура, 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 хладонотенителя измеряют поплавковым ротаметром 5. Мощность, потребляемую совместно электродвигателями хладонного 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

№ измерения	Давление хладона, кгс/см <sup>2</sup>		Температура, мВ							Расход хладонотенителя, дел	Мощность электродвигателя, Вт
	$p_0$	$p$	$t_1$	$t_2$	$t_{4'}$	$t_4$	$t_5$	$t_{s1}$	$t_{s2}$		
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 хладона определяют с помощью графика градуировки термопар, расход хладонотенителя – 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 диаграмме  $T-s$  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:

$$q_0 = h_1 - h_5;$$

$$l_k = h_2 - h_1;$$

$$q_1 = h_2 - h_4.$$

4. Производят проверку по тепловому балансу цикла:

$$q_1 = q_0 + l_k.$$

5. Определяют холодильный коэффициент цикла:

$$\varepsilon = q_0 / l_k.$$

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, м<sup>3</sup>/с;  $\rho$  – плотность хладоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – 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  $\rho$  и  $c_p$  в зависимости от  $t$ 

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20
$\rho, \text{кг/м}^3$	825	816	808
$c_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	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  $q_0, l_k, q_1, \epsilon, Q_0$ ;
- характеристику приборов;
- анализ опытных данных и выводы по результатам работы.

*Список литературы*

1. Теоретические основы хладотехники. Часть 1. Термодинамика / Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Изд-во «Колос», 1994. – 288 с.
2. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ. / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, А.В. Куприянова. – СПб.: СПбГАХПТ, 1993. – 309 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### 1. ФОРМЫ ТАБЛИЦ

Таблица 1.1

#### Характеристика приборов

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

Таблица 1.2

#### Данные градуировки термомпары

$t, ^\circ\text{C}$				
ЭДС, мВ				

### 2. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ О ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ВЕЩЕСТВ

Таблица 2.1

#### Термодинамические свойства хладагента R12 на линии насыщения

$T, \text{K}$	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
$T, \text{K}$	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
$T, \text{K}$	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 2.2

**Термодинамические свойства хладагента R13  
на линии насыщения**

$t_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$	0	10	20	28	28,84
$T_{\text{н}}, \text{K}$	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 2.3

**Термодинамические свойства хладагента R13  
в однофазной области**

$p, \text{МПа}$	$v \cdot 10^3, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$v \cdot 10^3, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$
	$T = 273,15 \text{ K}$			$T = 283,15 \text{ K}$		
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 2.4

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

$t_n, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$v'$	$v''$	$h'$	$h''$	$r, \text{кДж/кг}$
		$\text{м}^3/\text{кг}$		$\text{кДж/кг}$		
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 2.5

**Теплота парообразования хладагента R318**

$t, ^\circ\text{C}$	$r, \text{кДж/кг}$	$t, ^\circ\text{C}$	$r, \text{кДж/кг}$
14	108,27	20	105,71
16	107,42	22	104,83
18	106,57	24	103,94

Таблица 2.6

## Термодинамические свойства перегретого водяного пара

$t$ , °C	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /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

Окончание табл. 2.6

$t$ , °C	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг·К)	$v$ , м <sup>3</sup> /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

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ В УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ .....	7
ВЫПИСКА ИЗ ПРАВИЛ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ.....	8
НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТАХ.....	10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 .....	14
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.....	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.....	30
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.....	37
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.....	41
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.....	48
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7.....	54
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8.....	62
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9.....	67
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	73

Богданов Сергей Николаевич  
Данилова Галина Николаевна  
Клецкий Александр Владимирович  
Куприянова Алла Васильевна  
Филаткин Владимир Николаевич  
Щербов Марг Геннадиевич  
Цветков Олег Борисович  
Федоров Валерий Николаевич  
Митропов Владимир Викторович

## ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ

Учебное пособие

*Редактор*  
Е.О. Трусова

*Корректор*  
Н.И. Михайлова

*Компьютерная верстка*  
Н.В. Гуральник

*Дизайн обложки*  
Н.А. Потехина

*Директор ИПЦ*  
Т.Г. Смирнова

---

Подписано в печать 27.12.2005. Формат 60×84 1/16  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,65. Печ. л. 5,0. Уч.-изд. л. 4,75  
Тираж 300 экз. Заказ № С 162

---

СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9  
ИПЦ СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9