

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

Кафедра теоретических основ теплотехники

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ДАВЛЕНИЕМ
И ТЕМПЕРАТУРОЙ НАСЫЩЕННЫХ ВОДЯНЫХ ПАРОВ
ПРИ ИММИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ**

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Иваново 2022

Составители: И.М. ЧУХИН
А.В. ПЕКУНОВА
Д.В. РАКУТИНА
Редактор Е.Н. БУШУЕВ

Методические указания содержат теоретические положения, описание экспериментальной установки и порядок проведения опыта для выполнения лабораторной работы на имитационной модели с использованием ЭВМ по определению зависимости между давлением и температурой насыщения водяных паров и изучению изохорного процесса нагрева воды и водяного пара.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлениям 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» и 13.03.03 «Энергетическое машиностроение» изучающих, изучающих теплотехнические дисциплины.

Утверждены учебно-методической комиссией ТЭФ

Рецензент

кафедра теоретических основ теплотехники ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. К выполнению работы допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности в лаборатории технической термодинамики с записью в соответствующем журнале и личной подписью студента и преподавателя, проводившего инструктаж.

2. Включение и выключение установки осуществляется только инженером или лаборантом с разрешения преподавателя.

3. Приступать к выполнению работы разрешается только после ознакомления с методикой проведения эксперимента и самим лабораторным стендом, в чем должен убедиться преподаватель.

4. Запрещается:

а) осуществлять подключение стенда к электропитанию и последующее его отключение;

б) подключать и отсоединять любые электрические кабели, провода, заземления и другие соединения оборудования;

в) притрагиваться к незаизолированным частям любых проводов, к радиаторам и трубопроводам систем отопления, водоснабжения и канализации, если таковые обнаружатся;

г) работать при отсутствии света или недостаточном освещении.

5. Обо всех замеченных неисправностях на установке немедленно докладывать преподавателю, и до их полного устранения к выполнению работы не приступать.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Экспериментальное определение зависимости между давлением и температурой насыщения водяных паров.

2. Изучение фазовых диаграмм p,t -, p,v - и изохорного процесса нагрева воды и водяного пара.

3. Определение количества испаренной жидкой фазы воды, начиная с момента герметизации сосуда, количества теплоты, затраченной на испарение этой воды, и количества теплоты, затраченной на реализацию всего изохорного процесса.

4. Расчет процесса воды и водяного пара по заданию преподавателя. Построение данного процесса в масштабе в p,v -, T,s - и h,s -диаграммах с изображением пограничных кривых, а также изотерм, изобар, изохор или $x = \text{const}$, фиксирующих начало и конец процесса.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1. Вода. Основные понятия, фазовые состояния и процессы ее фазовых переходов

Вода может находиться в трех состояниях: твердая фаза (снег, лед), жидкая фаза (вода), газообразная фаза (пар).

Возможно одновременное существование нескольких фазовых состояний воды при определенных параметрах [1].

Пар, находящийся в равновесном состоянии с жидкой фазой воды, из которой он образовался, называется насыщенным паром, а соответствующие ему температура и давление называются температурой и давлением насыщения.

В случае, если над жидкой фазой находится только ее паровая фаза, то давление пара равно давлению жидкости, и они оба находятся в состоянии насыщения и имеют одинаковые давление и температуру (при этом кипения жидкости может и не быть).

Процесс некомпенсированного перехода вещества из жидкой фазы в паровую называется испарением.

Процесс некомпенсированного перехода вещества из твердой фазы в паровую называется сублимацией.

Процесс, противоположный сублимации, т.е. переход воды из паровой фазы непосредственно в твердую, называется десублимацией.

Процесс перехода вещества из жидкой фазы в паровую непосредственно внутри жидкости называется кипением.

Жидкая и паровая фазы воды при кипении находятся в состоянии насыщения и имеют одинаковые давления и температуры.

Любой процесс перехода воды из жидкой фазы в паровую называется парообразованием. Процесс, противоположный парообразованию, т.е. некомпенсированный переход воды из паровой фазы в жидкую, называется конденсацией.

Пар в состоянии насыщения (кипения) называется сухим насыщенным.

Двухфазная смесь «жидкость + пар» в состоянии насыщения называется влажным насыщенным паром.

Поскольку паровая и жидкая фазы воды в состоянии насыщения имеют одинаковые температуры и давления, то для влажного насыщенного пара требуется дополнительная характеристика, позволяющая определить другие его параметры. В качестве такой характеристики вводится понятие степени сухости пара x , представляющее собой отношение массы сухого насыщенного пара $m_{с.н.п.}$ к общей массе смеси пара и жидкости в состоянии насыщения $m_{см} = m_{с.н.п.} + m_{ж.с.н.}$ в данном объеме:

$$x = \frac{m_{\text{с.н.п.}}}{m_{\text{с.н.п.}} + m_{\text{ж.с.н.}}} . \quad (2.1)$$

Отношение массы жидкости в состоянии насыщения к массе смеси пара и жидкости в состоянии насыщения называется степенью влажности (1 - x):

$$1 - x = \frac{m_{\text{ж.с.н.}}}{m_{\text{с.н.п.}} + m_{\text{ж.с.н.}}} . \quad (2.2)$$

Используя степень сухости пара, можно рассчитать удельный объем и энергетические параметры влажного насыщенного пара по соответствующим параметрам жидкости и пара в состоянии насыщения:

$$v_x = v' + x \cdot (v'' - v') ; \quad (2.3)$$

$$h_x = h' + x \cdot (h'' - h') = h' + x \cdot r ; \quad (2.4)$$

$$s_x = s' + x \cdot (s'' - s') ; \quad (2.5)$$

$$u_x = u' + x \cdot (u'' - u') , \quad (2.6)$$

где v – удельный объем, м³/кг; h – удельная энтальпия, кДж/кг; s – удельная энтропия, кДж/(кг·К); x – степень сухости пара; r – удельная теплота парообразования, кДж/кг.

В формулах (2.3) – (2.6) одним штрихом обозначены параметры воды в состоянии насыщения, а двумя штрихами – сухого насыщенного пара.

Зная один из параметров влажного насыщенного пара в выражениях (2.3) – (2.6), можно найти степень сухости этого пара:

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{h_x - h'}{r} = \frac{s_x - s'}{s'' - s'} = \frac{u_x - u'}{u'' - u'} . \quad (2.7)$$

Пар с температурой выше температуры насыщения при данном давлении называется перегретым паром. Разность температур перегретого пара и насыщенного пара того же давления называется степенью перегрева пара.

2.2. Фазовые диаграммы p, t и p, v для воды и пара

Области существования воды в различных фазовых состояниях [1] можно представить в диаграмме p, t (рис. 2.1).

Линия АВ – линия фазового перехода твердой и жидкой фазы: слева от нее лед, справа – жидкость. Линия АК – линия фазового перехода жидкой и паровой фазы воды: слева от нее жидкость, справа – пар. Линия АС – линия фазового перехода твердой фазы воды и пара: слева от нее лед, справа – пар.

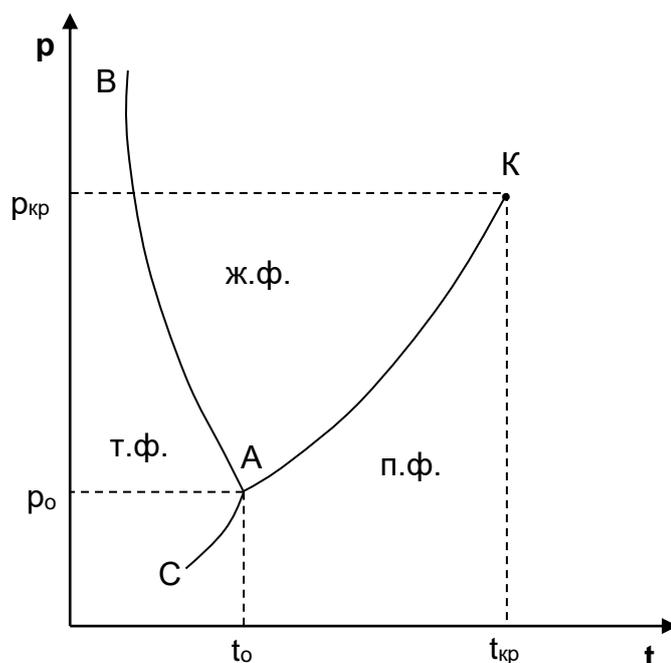


Рис. 2.1. Фазовая диаграмма p,t - для воды

На линиях фазового перехода возможно существование двух фаз воды: на AB – лед + жидкость; на AK – жидкость + пар; на AC – лед + пар. Все линии фазовых переходов имеют одну общую точку A , где возможно одновременное существование трех фаз воды, – это тройная точка воды. Она имеет температуру $t_0 = 0,01^\circ\text{C}$ и давление $p_0 = 611,2$ Па.

Линия AK заканчивается вверху критической точки K с параметрами: $t_{кр} = 374,12^\circ\text{C}$, $p_{кр} = 221,15$ бар. Переход из жидкой фазы в паровую выше критической точки минует двухфазное состояние воды, т.е. осуществляется мгновенно.

В данной лабораторной работе экспериментально определяется небольшой участок линии AK диаграммы p,t при давлениях от 1 до 50 бар.

На рис. 2.2 показаны фазовые состояния воды и пара в p,v -диаграмме:

- на линии $x = 0$ находится жидкость в состоянии насыщения;
- на линии $x = 1$ – сухой насыщенный пар;
- между линиями $x = 0$ и $x = 1$ – влажный насыщенный пар;
- линия $t = 0^\circ\text{C}$ – изотерма жидкости при 0°C ;
- между $t = 0^\circ\text{C}$ и $x = 0$ находится жидкая фаза воды;
- выше $x = 1$ – перегретый пар;
- выше критической точки K нет видимого фазового перехода пара в жидкость или наоборот.

На этом же рисунке показан изохорный процесс 12 нагрева воды в данной работе.

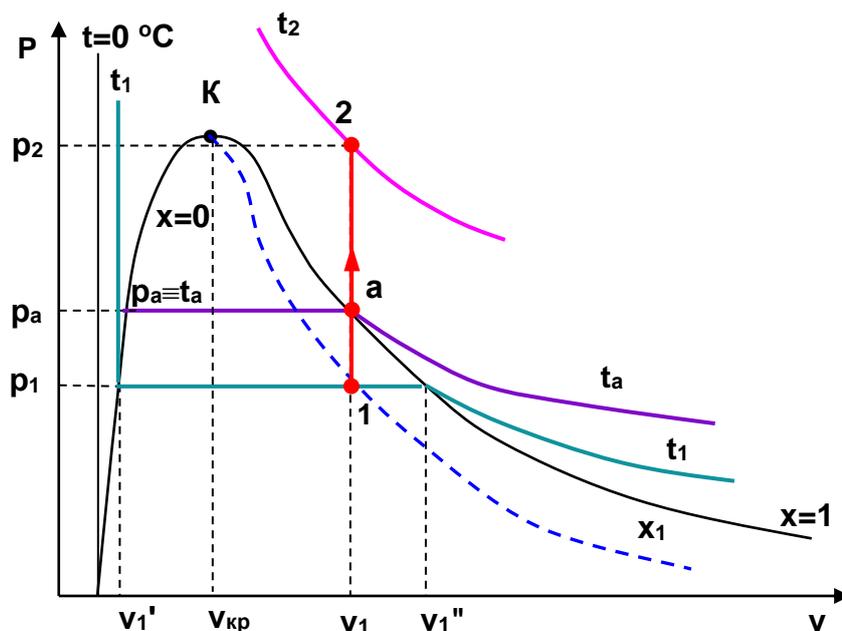


Рис. 2.2. Изохорный процесс водяного пара в p, v - диаграмме

В данной лабораторной работе изучается процесс изохорного нагрева воды в жестком сосуде. Нагрев воды начинается из области влажного насыщенного пара (рис. 2.2, точка 1). В том случае если удельный объем воды в начале процесса больше критического ($v_1 > v_{кр}$), то этот процесс в p, v - диаграмме может завершиться ниже линии $x = 1$ (ниже точки a , это область влажного насыщенного пара, т.к. $p_2 < p_a$) или выше этой линии (точка 2, это область перегретого пара, т.к. $p_2 > p_a$). Если в точке 1 удельный объем меньше критического ($v_1 < v_{кр}$), то завершение процесса изохорного нагрева воды может находиться или в области влажного насыщенного пара (ниже $x = 0$), или в области жидкости (выше $x = 0$).

2.3. Расчет изохорного процесса нагрева воды

Расчет изохорного процесса нагрева воды заключается в определении параметров воды в начале и конце процесса и определении теплоты этого процесса.

Параметры в начале процесса определяются по степени сухости x_1 и давлению p_1 . Давление p_1 определяется по показанию прибора в момент герметизации сосуда, когда из сосуда удален весь воздух путем его вытеснения насыщенным водяным паром. Начальное состояние воды (рис. 2.2, точка 1) соответствует влажному насыщенному пару, степень сухости которого определяется выражением:

$$x_1 = \frac{v_1 - v_1'}{v_1'' - v_1'}, \quad (2.8)$$

где v_1 , v_1' и v_1'' – удельные объемы в начале процесса влажного насыщенного пара, жидкости в состоянии насыщения и сухого насыщенного пара соответственно.

Энтальпия и внутренняя энергия водяного пара в начале процесса определяется выражениями:

$$h_1 = h_1' + x_1 \cdot r_1, \quad (2.9)$$

$$u_1 = h_1 - p_1 \cdot v_1. \quad (2.10)$$

Определение параметров в конце процесса выполняется на основании известных величин $v_2 = v_1$ и p_2 . Прежде чем определить другие параметры, необходимо выяснить, какое фазовое состояние воды в конце процесса (см. раздел 2.2).

В случае если в конце процесса будет влажный насыщенный пар ($p_2 < p_a$), то по давлению p_2 и $v_2 = v_1$ определяются его энтальпия и внутренняя энергия (рис. 2.3):

$$h_2 = h_2' + x_2 \cdot r_2, \quad (2.11)$$

$$u_2 = h_2 - p_2 \cdot v_2. \quad (2.12)$$

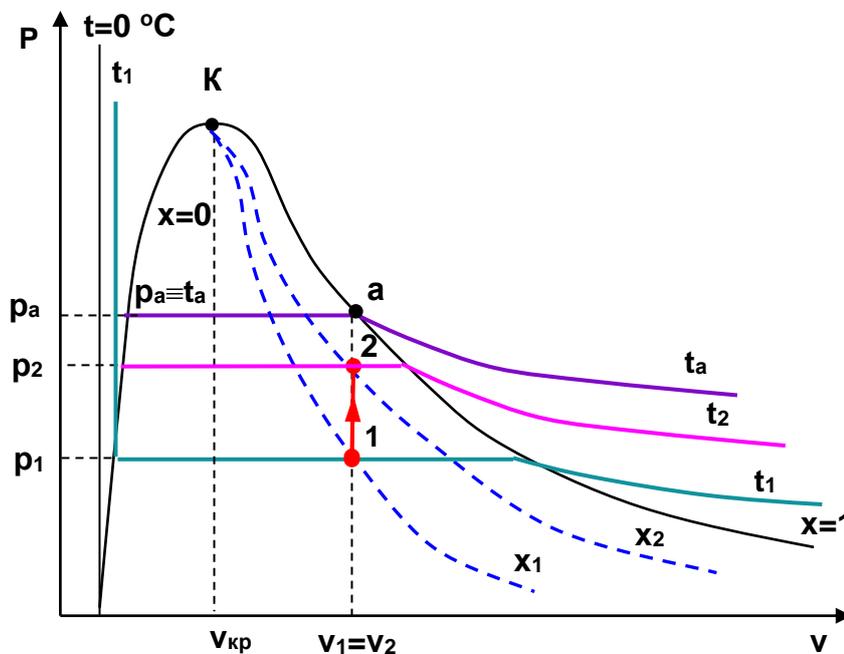


Рис. 2.3. Изохорный процесс водяного пара в p, v - диаграмме в области влажного насыщенного пара

В формулах (2.10) и (2.12) при использовании удельной энтальпии в кДж/кг давление подставляют в кПа, тогда удельная внутренняя энергия будет иметь размерность кДж/кг.

Степень сухости пара в конце процесса (точка 2, рис. 2.3) рассчитывается по формуле:

$$x_2 = \frac{v_2 - v_2'}{v_2'' - v_2'} \quad (2.13)$$

где v_2' , v_2'' – удельные объемы кипящей жидкости и сухого насыщенного пара в конечном состоянии, определяемые по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара [2] при давлении p_2 .

В случае если в конце процесса будет перегретый пар ($p_2 > p_a$), энтальпия и внутренняя энергия его определяются по давлению p_2 и температуре t_2 по таблицам воды и водяного пара [2].

Теплота изохорного процесса в соответствии с первым законом термодинамики равна изменению внутренней энергии водяного пара:

$$q = u_2 - u_1 \quad (2.14)$$

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.1. Основным элементом установки является толстостенный герметично закрытый стальной сосуд 6, заполненный пароводяной смесью. Внутренний диаметр сосуда $D = 60$ мм, а высота внутренней поверхности сосуда $H = 100$ мм. На нижнюю половину этого сосуда навит нихромовый электронагреватель 8.

Нагреватель подключается к электросети через автотрансформатор включателем 9. Паровое пространство сосуда 6 соединено с манометром 4 стальной трубкой, герметично подсоединенной к отверстию в крышке сосуда (на мат-модели установки в ЭВМ фиксируются абсолютные значения давления). Внутри сосуда через второе отверстие в крышке впаяна гильза, в которой помещается термомпара 10. Температура термомпары фиксируется при помощи цифрового электронного термометра 3 (на мат-модели установки фиксируются абсолютные значения температуры t , в $^{\circ}\text{C}$).

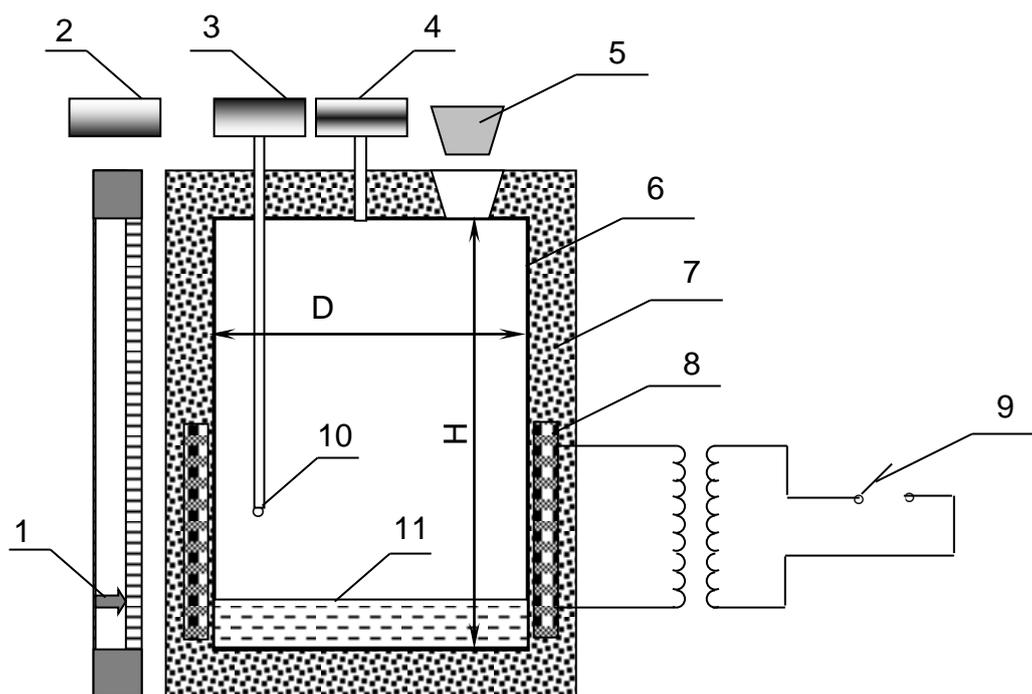


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки:

1 – указатель уровня воды; 2 – фиксатор массы воды в сосуде; 3 – прибор, фиксирующий температуру воды в сосуде; 4 – прибор, фиксирующий давление воды в сосуде; 5 – герметичная пробка; 6 – жесткий металлический сосуд; 7 – теплоизоляция; 8 – электронагреватель; 9 – включатель электропитания электронагревателя; 10 – термомпара; 11 – жидкая фаза воды в сосуде; $D=60$ мм – внутренний диаметр сосуда; $H=100$ мм – высота поверхности сосуда

Для уменьшения потерь теплоты в окружающую среду сосуд снабжен теплоизоляцией 7. Сосуд 6 имеет герметичную пробку 5, закрывающую отверстие в верхней его части. Отверстие предназначено для заполнения сосуда водой и выпуска воздуха при достижении водой состояния насыщения (кипения). Уровень воды в сосуде фиксируется указателем 1, а ее массовое количество – прибором 2.

4. ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТА

Опыт проводится на ЭВМ с помощью программы имитационной математической модели, реализующей изохорный процесс нагрева воды в жестком сосуде.

4.1. Инструкция для пользователя программой

Программа размещена на ЭВМ в компьютерном классе кафедры ТОТ (аудитория А-333). Выполнение программы осуществляется в следующей последовательности.

1 – активизируется запускаемый файл - **Station.exe** и появляется запрос ввода пароля (рис. 4.1).

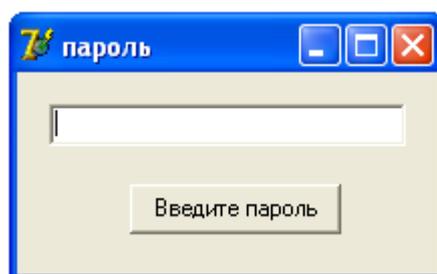


Рис. 4.1. Окно ввода пароля

2 – вводится пароль (информация о пароле находится у преподавателя), если пароль не установлен, то просто нажимается кнопка «введите пароль» и появляется заставка выбора сферы деятельности (рис. 4.2).

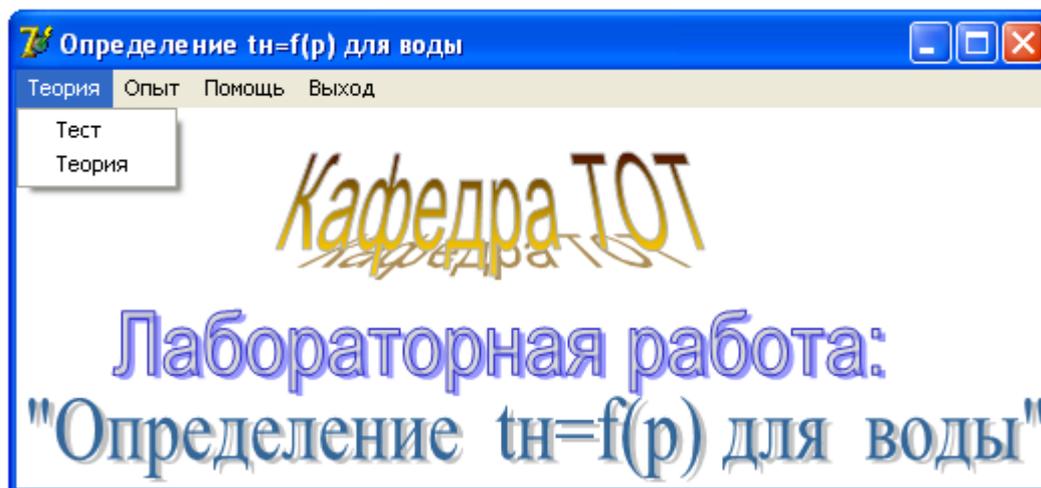


Рис. 4.2. Окно выбора сферы деятельности

3 – в разделе «теория-теория» можно ознакомиться с основными теоретическими положениями работы и с методикой расчета изохорного процесса водяного пара.

4 – в разделе «теория-тест» (рис.4.3 – 4.5) можно выполнить тестирование знаний студентов, полученных ими при освоении расчета изохорного процесса водяного пара.

После нажатия кнопки «Тест» программа запрашивает данные студента (рис. 4.3). Данные о студенте заносятся в специальный файл-отчет.

Рис. 4.3. Окно регистрации

После регистрации студенту предлагается выполнить тест (рис. 4.4). Здесь студент вводит исходные данные (массу жидкости в баллоне), полученные от преподавателя, а определяемые величины – это температура и давление насыщения на $x = 1$ в расчетном изохорном процессе и его начальная степень сухости x_1 при давлении насыщения воды 0,1 МПа. Если вычисления были верны, то после нажатия кнопки «Ответ» появляется окошко с сообщением об оценке. Допустимая погрешность в расчетах – 1%. По заданию преподавателя устанавливается или нет время на решение (таймер).

Внимание. При вводе чисел в тесте необходимо перейти на русскую клавиатуру (Ru) для отделения запятой дробной части числа.

Наименование	Единицы измерения	Идентификатор	Значение
Масса воды	кг	m	

Наименование	Единицы измерения	Идентификатор	Значение
Давление насыщения	МПа	p	
Температура насыщения	°C	t	
Степень сухости		x	

Рис. 4.4. Окно ввода исходных данных

Оценка студента выдается на экран монитора (рис. 4.5) и заносится в файл-отчет. Данные о результатах тестирования студентов в файле-отчете можно посмотреть в основном меню, нажав кнопку «Помощь», выбрав подпункт «Просмотр результатов».

Внимание Тестирование выполняется после входа в раздел «Опыт».

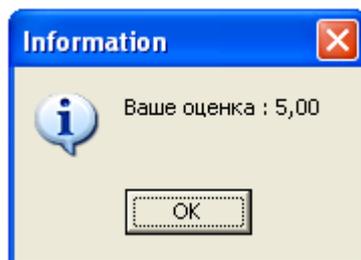


Рис.4.5. Окно результата тестирования

5 – в разделе опыт (рис. 4.6) задается с помощью ползунка необходимое значение массы пароводяной смеси в сосуде в момент его закрытия в диапазоне от 0,00057 до 0,00282 кг. При этом минимальное значение 0,00057 кг не выбирать в связи с появлением ошибки в программе в виде выдачи ею неправильных параметров.

Значения температуры и давления в начале опыта постоянны и имеют значения $t = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $p = 0,1\text{ МПа}$.

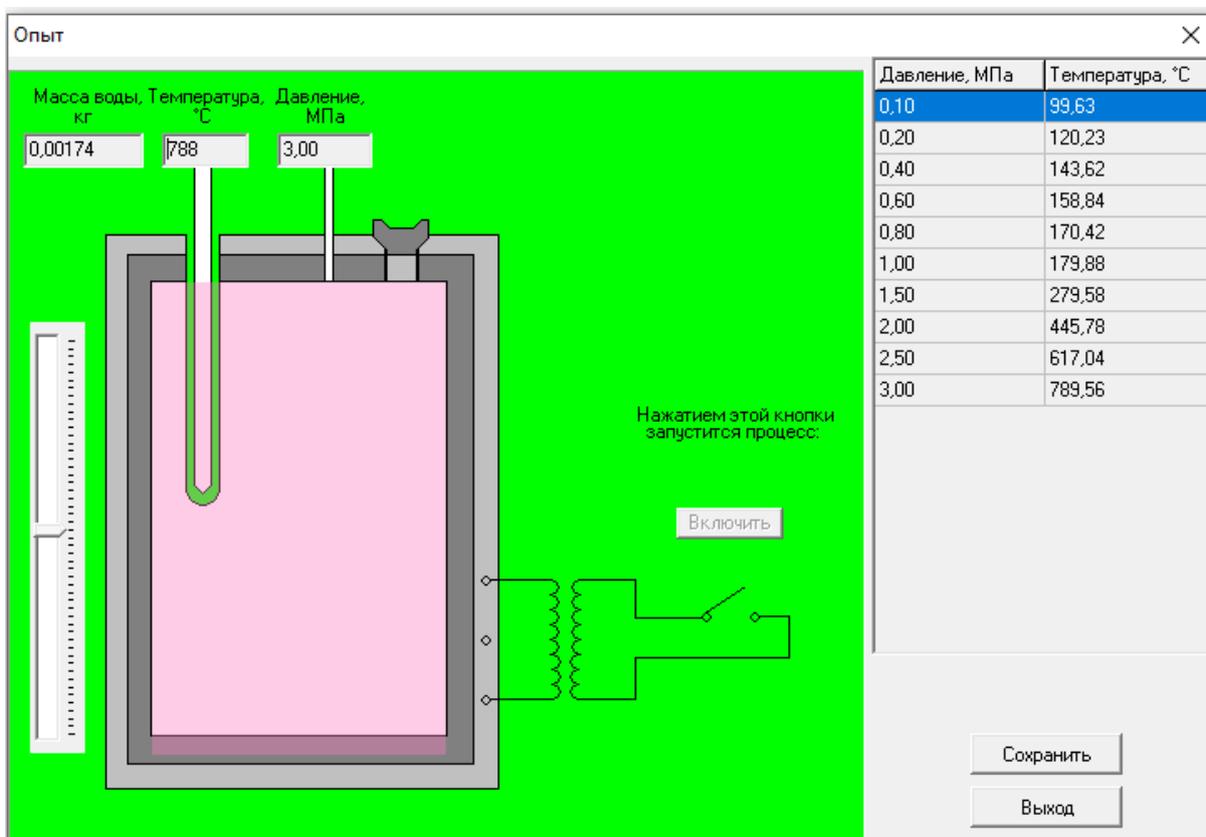


Рис. 4.6. Окно экспериментальной установки

После выбора массы воды нажимается кнопка «включить» и наблюдается процесс изохорного нагрева воды. Результаты опыта (значения давления и температуры, получаемые за счет нагрева пароводяной смеси в сосуде) могут быть сохранены и распечатаны через сохраненный файл путем нажатия кнопки «Сохранить».

6 – в разделе помощь осуществляется просмотр результатов работы студентов по тесту через пароль, если он установлен.

4.2. Порядок проведения опыта

Заполнить сосуд водой путем перемещения ползунка 1 до уровня, заданного преподавателем (рис. 3.1). При этом в окне 2 появится значение массы воды $m_{см}$ в кг.

Кнопкой «включить» замыкается ключ 9 и подключается электронагреватель 8. В сосуде образуется пароводяная смесь. В момент полного вытеснения паровой фазой воды воздуха из сосуда пробка 5 герметично закрывает сосуд 6. Далее происходит нагрев пара с фиксацией значений температуры $t_n^{опыт}$ и давления $p_n^{опыт}$ приборами 3 и 4. Нагрев воды завершатся при достижении максимального давления, на которое рассчитан сосуд. Результаты опыта сводятся в таблицу, расположенную в правой части рабочего окна программы (рис. 4.6).

Результаты опыта, включая массу воды, заносят в журнал наблюдений (рис. 4.7).

Журнал наблюдений

Фамилия студента _____ группа _____

Дата «__» _____ 202 г. Подпись преподавателя _____

Атмосферное давление $B = 0,1$ МПа

Показания термометра в лаборатории $t_0 = 5$ °С

Масса воды в сосуде $m_{см} =$ _____ кг

$p_n^{опыт}$	МПа								
$t_n^{опыт}$	°С								
$t_n^{табл}$	°С								

Давление $p_2 =$ _____ МПа задается преподавателем для расчета процесса

Рис. 4.7. Журнал наблюдений

Преподаватель по данным этого журнала задает давление p_2 для расчета изохорного процесса индивидуально для каждого студента. Значения температуры насыщения $t_n^{табл}$ определяют для всех значений давления $p_n^{опыт}$ по таблицам воды и водяного пара [2].

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Начальная точка 1 (см. рис. 2.2) расчетного изохорного процесса 12 берется в момент закрытия пробки, который соответствует заполнению пароводяной смесью всего сосуда при полном выходе воздуха из него.

Удельный объем в начале процесса определяется по формуле:

$$v_1 = \frac{V}{m_{\text{см}}}, \quad (5.1)$$

где $m_{\text{см}}$ – масса пароводяной смеси, кг; V – внутренний объем стального сосуда, м³.

Внутренний объем стального сосуда рассчитывается по внутреннему диаметру D и высоте сосуда H , размеры, которых приведены выше (рис. 3.1):

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H}{4}. \quad (5.2)$$

Степень сухости пара в начале процесса рассчитывается по формуле:

$$x_1 = \frac{v_1 - v_1'}{v_1'' - v_1'}, \quad (5.3)$$

где v_1' , v_1'' – удельные объемы кипящей жидкости и сухого насыщенного пара начального состояния, определяемые по табл. II термодинамических свойств воды и водяного пара [2] при первом измеренном значении давления $p_{1\text{н}}^{\text{опыт}}$.

Энтальпия h_1 и внутренняя энергия u_1 водяного пара в начале процесса определяются по формулам:

$$h_1 = h_1' + x_1 \cdot r_1; \quad (5.4)$$

$$u_1 = h_1 - p_{1\text{н}}^{\text{опыт}} \cdot v_1, \quad (5.5)$$

где h_1' , r_1 – удельная энтальпия кипящей жидкости и теплота парообразования, определяемые по табл. II термодинамических свойств воды и водяного пара [2] при давлении $p_{1\text{н}}^{\text{опыт}}$.

В формулу (5.5) при использовании удельной энтальпии в кДж/кг *давление подставляют в кПа*, тогда удельная внутренняя энергия будет иметь размерность кДж/кг.

Поскольку сосуд жесткий, процесс нагрева считается изохорным ($v = \text{const}$). Следовательно, вторую точку процесса можно зафиксировать конечным давлением p_2 и начальным объемом $v_1 = v_2$.

Прежде чем проводить расчет, необходимо определить фазовое состояние воды в конце изохорного процесса (рис. 2.2 или 2.3, точка 2) и изобразить процесс нагрева воды и водяного пара в

p, v - диаграмме без соблюдения масштаба. Для этого при конечном давлении p_2 необходимо сравнить опытное значение температуры пара $t_{2н}^{опыт}$ с табличным $t_{2н}^{табл}$. Табличное значение температуры $t_{2н}^{табл}$ находится при заданном давлении p_2 по табл. II термодинамических свойств воды и водяного пара [2].

Если $t_{2н}^{опыт} > t_{2н}^{табл}$, то в конце процесса будет перегретый пар (рис. 2.2, точка 2). В этом случае вся вода в сосуде перешла в паровую фазу. Энтальпия перегретого пара h_2 определяется по табл. III термодинамических свойств воды и водяного пара [2] при давлении p_2 и температуре $t_{2н}^{опыт}$. Внутреннюю энергию u_2 рассчитывают по формуле:

$$u_2 = h_2 - p_2 \cdot v_2, \quad (5.6)$$

где давление p_2 подставляют в кПа, а $v_2 = v_1$.

Также необходимо найти температуру t_a , давление p_a и энтальпию h_a , при которых изохорный процесс пересекает линию $x = 1$ (рис. 2.2, точка а). Нахождение этих параметров ведется по табл. I или II термодинамических свойств воды и водяного пара [2] по значению $v'' = v_1 = v_a$. При этом внутреннюю энергию u_a рассчитывают по формуле:

$$u_a = h_a - p_a \cdot v_a. \quad (5.7)$$

Если $t_{2н}^{опыт} = t_{2н}^{табл}$ и $p_2 < p_a$, то в конце процесса будет влажный насыщенный пар (рис. 2.3, точка 2). В этом случае по давлению p_2 и $v_2 = v_1$ определяются степень сухости пара x_2 в конце изохорного процесса по формуле:

$$x_2 = \frac{v_2 - v_2'}{v_2'' - v_2'}, \quad (5.8)$$

где v_2' , v_2'' – удельные объемы кипящей жидкости и сухого насыщенного пара в конечном состоянии, определяемые по табл. II термодинамических свойств воды и водяного пара [2] при давлении p_2 .

Энтальпию h_2 влажного насыщенного пара рассчитывают по формуле:

$$h_2 = h_2' + x_2 \cdot r_2, \quad (5.9)$$

где h_2' , r_2 – удельная энтальпия кипящей жидкости и удельная теплота парообразования, определяемые по табл. II термодинамических свойств воды и водяного пара [2] при давлении p_2 .

Внутреннюю энергию u_2 определяют по формуле (5.6).

Если $t_{2н}^{опыт} = t_{2н}^{табл}$ и $p_2 = p_a$, то в конце процесса будет сухой насыщенный пар. При этом конечная точка 2 изохорного процесса находится на линии $x = 1$ и совпадает с точкой а на рис. 2.3. Энтальпию h_2 находят по табл. I или II термодинамических свойств во-

ды и водяного пара [2] по значению $v'' = v_1$. Внутреннюю энергию u_2 рассчитывают по формуле (5.6).

Результаты определения параметров во всех характерных точках изохорного процесса нагрева воды заносят в табл. 1. При этом если точка 2 находится в области перегретого пара, то в графе x_2 ставится прочерк, а если точка 2 расположена на линии $x = 1$, то параметры точки а и точки 2 совпадают.

Таблица 1. Параметры характерных точек процесса

Точка 1					
p_1	t_1	v_1	x_1	h_1	u_1
бар	°C	м ³ /кг	—	кДж/кг	кДж/кг
Точка а (x=1)					
p_a	t_a	h_a	u_a		
бар	°C	кДж/кг	кДж/кг		
Точка 2					
p_2	t_2	$t_{2н}$	x_2	h_2	u_2
бар	°C	°C	—	кДж/кг	кДж/кг

После определения области состояния насыщения воды и водяного пара процесса 1а (или 12 при $p_2 < p_a$) выполняется графическое построение в масштабе зависимости давления насыщения воды и водяного пара от температуры по опытным данным $p_n = f(t_n^{\text{опыт}})$ и по справочным данным [2] $p_n = f(t_n^{\text{табл}})$ на одной координатной сетке в диапазоне давлений $p_1 - p_a$. Сопоставляются опытные и табличные зависимости и делаются выводы о сходимости результатов опытных и табличных данных и характере зависимости $p_n = f(t_n)$ для воды и водяного пара.

После качественного анализа процесса выполняется его расчет. В результате расчета определяется количество испаренной жидкой фазы воды, начиная с момента герметизации сосуда, количество теплоты, затраченной на испарение этой воды, и количество теплоты, затраченное на реализацию всего процесса 12.

Определение массы испаренной жидкости

Масса жидкой фазы воды в момент герметизации сосуда (рис. 2.2, точка 1) определяется выражением

$$m_{1ж} = m_{см} \cdot (1 - x_1). \quad (5.10)$$

В том случае, если процесс 12 завершается в области перегретого пара или на линии $x=1$, вся эта жидкая фаза воды будет испарена $m_{\text{исп}} = m_{1\text{ж}}$.

При завершении процесса в области влажного насыщенного пара (см. рис. 2.3) масса испаренной жидкой фазы воды будет соответствовать величине

$$m_{\text{исп}} = m_{\text{см}} \cdot (x_2 - x_1). \quad (5.11)$$

Определение теплоты изохорного процесса

Количество теплоты, идущее только на образование паровой фазы в данном процессе, можно рассчитать двумя методами.

Упрощенный метод

В зависимости от области завершения процесса изохорного парообразования определяется увеличение удельной внутренней энергии пара в этом процессе:

- при завершении процесса в перегретом паре

$$\Delta u_{\text{исп}} = u_a - u_1; \quad (5.12)$$

- при завершении процесса во влажном насыщенном паре или на линии $x = 1$

$$\Delta u_{\text{исп}} = u_2 - u_1. \quad (5.13)$$

Количество теплоты, затраченное на испарение жидкой фазы воды (для упрощения считаем $m_{\text{исп}} = m_{\text{см}}$), начиная с момента герметизации сосуда, соответствует выражению

$$Q_{\text{исп}} = m_{\text{см}} \cdot \Delta u_{\text{исп}}. \quad (5.14)$$

Полное количество теплоты процесса 12 рассчитывается по выражению

$$Q = m_{\text{см}} \cdot (u_2 - u_1). \quad (5.15)$$

Все результаты расчета процесса сводятся в таблицу 2.

Точный метод

В этом методе оценивается теплота, имеющая отношение только к массе испаренной паровой фазы воды: $m_{1\text{ж}}$ при завершении процесса в области перегретого пара или $m_{\text{исп}}$ при завершении процесса в области влажного пара. Это количество испаренной воды в начале процесса имеет внутреннюю энергию жидкости в состоянии насыщения (u'_1), а в конце процесса – внутреннюю энергию сухого насыщенного пара (u_a или u''_2). Определение увеличения удельной

внутренней энергии в процессе парообразования этой массы жидкости соответствует выражениям:

- при завершении процесса в перегретом паре

$$\Delta u_{\text{исп}} = u_a - u'_1, \quad (5.16)$$

где $u'_1 = h'_1 - p_1 \cdot v'_1$ – внутренняя энергия жидкости в состоянии насыщения; h'_1 и v'_1 – энтальпия и удельный объем воды в состоянии насыщения в начале процесса, определяемые по табл. II термодинамических свойств воды и водяного пара [2] при давлении p_1 .

Количество теплоты, затраченное на испарение жидкой фазы воды, начиная с момента герметизации сосуда, соответствует выражению

$$Q_{\text{исп}} = m_{1ж} \cdot \Delta u_{\text{исп}}; \quad (5.17)$$

- при завершении процесса во влажном насыщенном паре или на линии $x = 1$

$$\Delta u_{\text{исп}} = u''_2 - u'_1, \quad (5.18)$$

где $u''_2 = h''_2 - p_2 \cdot v''_2$ – внутренняя энергия сухого насыщенного пара; h''_2 и v''_2 – энтальпия и удельный объем сухого насыщенного пара в конце процесса парообразования, определяемые по табл. II термодинамических свойств воды и водяного пара [2] при давлении p_2 .

Количество теплоты, затраченное на испарение жидкой фазы воды, начиная с момента герметизации сосуда, соответствует выражению

$$Q_{\text{исп}} = m_{\text{исп}} \cdot \Delta u_{\text{исп}}. \quad (5.19)$$

Все результаты расчета процесса сводятся в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты расчета процесса изохорного нагрева воды

Упрощенный метод					
$m_{\text{см}}$	$m_{\text{исп}} (m_{1ж})$	$\Delta u_{\text{исп}}$	$Q_{\text{исп}}$	$u_2 - u_1$	Q
кг	кг	кДж/кг	кДж	кДж/кг	кДж
Точный метод					
$m_{\text{см}}$	$m_{\text{исп}} (m_{1ж})$	$\Delta u_{\text{исп}}$	$Q_{\text{исп}}$		
кг	кг	кДж/кг	кДж		

6. ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССА ВОДЯНОГО ПАРА В p,v -, T,s - И h,s - ДИАГРАММАХ

По заданию преподавателя выполняется расчет и построение в фазовых диаграммах p,v , T,s и h,s одного из процессов воды и водяного пара. Варианты заданий приведены в Приложении данных методических указаний.

Расчет выполняют в следующей последовательности:

1. Определяют фазовые состояние воды и водяного пара в начальной (точка 1) и конечной (точка 2) точках процесса и находят параметры p , t , v , h , u , s в этих точках. Определенные параметры данных точек сводятся в таблицы 3 и 4;

2. Рассчитывают удельную теплоту q , удельную работу изменения объема ℓ и удельные изменения: энтальпии, внутренней энергии, энтропии процесса. Результаты расчета сводятся в таблицы 3 и 4;

3. Строят процесс в p,v -, T,s - и h,s - диаграммах в соответствии с заданными условиями. На диаграммах изображают пограничные кривые воды в состоянии насыщения ($x = 0$) и сухого насыщенного пара ($x = 1$), а также изотермы, изобары, изохоры или линии $x = \text{const}$, фиксирующие начало и конец процесса. Графическое построение выполняют с соблюдением масштаба на миллиметровке или с использованием современных графических программ, таких как Microsoft Excel или MathCad Prime.

Таблица 3. Параметры начального и конечного состояния процесса воды и водяного пара

Вариант № _____ Процесс _____ = const

Параметр	p , МПа	t , °С	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	u , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)
Точка 1						
Точка 2						

Таблица 4. Результаты расчета процесса воды и водяного пара

Величина / процесс	q , кДж/кг	ℓ , кДж/кг	Δu , кДж/кг	Δh , кДж/кг	Δs , кДж/(кг·К)
_____ = const					

Пример расчета процесса воды и водяного пара, а также порядок построения фазовых диаграмм подробно описаны в методических указаниях № 2729 [4].

7. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен включать следующие разделы.

1. Цель работы.
2. Задание.
3. Схема экспериментальной установки.
4. Журнал наблюдений, подписанный преподавателем.
5. Расчет значений давления насыщения и температуры насыщения изохорного процесса нагрева воды на $x = 1$, а также степени сухости начала этого процесса x_1 по заданной в опыте массе воды в баллоне при $p = 0,1$ МПа (когда в баллоне закрывается пробка, а вода и пар в состоянии насыщения).
6. Построение в масштабе функциональных зависимостей $p_n = f(t_n^{\text{опыт}})$, $p_n = f(t_n^{\text{табл}})$ на одной координатной сетке и их анализ.
7. Таблица параметров характерных точек процесса.
8. Расчет по определению массы испаренной жидкой фазы воды, начиная с момента герметизации сосуда.
9. Расчет количества теплоты, затраченной на испарение жидкой фазы воды в процессе по упрощенному и точному методам (задается преподавателем).
10. Расчет количества теплоты, затраченного на реализацию всего изохорного процесса.
11. Таблица сводных данных результатов расчета изохорного процесса нагрева воды.
12. Расчет процесса воды и водяного пара по заданию преподавателя. Построение данного процесса в масштабе в p,v -, T,s - и h,s -диаграммах.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ОТЧЕТА ПО РАБОТЕ

1. Поясните принцип работы экспериментальной установки.
2. Чем объясняется разница теплоты, затраченной на испарение жидкой фазы воды по упрощенному и точному методам ?
3. На что расходуется разница теплоты, идущей на испарение жидкой фазы воды в опыте, определенной по упрощенному и точному методам, и как ее можно еще рассчитать?
4. Что такое состояние насыщения воды и пара?
5. Какой пар называется влажным?
6. Какой пар называется сухим насыщенным?
7. Какой пар называется перегретым?
8. Что такое теплота парообразования, и как она определяется?
9. Что такое степень сухости пара?
10. Что такое влажность пара?
11. Изобразите фазовую p, t - диаграмму воды и водяного пара и покажите на ней участок, который вы определяли в опыте.
12. Какие фазовые состояния воды и водяного пара на пограничных кривых $x=0$ и $x=1$?
13. Как вычисляют энтальпию сухого насыщенного и перегретого пара?
14. Как вычисляют внутреннюю энергию влажного и сухого насыщенного пара?
15. Изобразите фазовые диаграммы p, v , T, s и h, s для воды и водяного пара.
16. Какой процесс водяного пара реализуется в данном процессе? Изобразите его в p, v -, T, s - и h, s - диаграммах.
17. Чему равна степень сухости пара, если его влажность равна 0,1?
18. Можно ли получить перегретый пар при $t=20^{\circ}\text{C}$?
19. Какое фазовое состояние имеет H_2O при давлении 1,5 МПа и температуре 100°C ?
20. При $p=0,9$ МПа вода нагрета до $t=150^{\circ}\text{C}$. На сколько градусов еще нужно нагреть воду, чтобы началось кипение?
21. При каком давлении кипит вода, имеющая температуру 190°C ?
22. Определите фазовое состояние водяного пара, если давление его 1,5 МПа, а температура $198,28^{\circ}\text{C}$.
23. Определите фазовое состояние воды при температуре $t=200^{\circ}\text{C}$ и энтальпии $h=852,4$ кДж/кг.
24. Плотность воды 800 кг/м³ при температуре 300°C . Определите ее фазовое состояние.
25. Определите фазовое состояние 5 кг воды, занимающей 10 м³ при 120°C .
26. Найдите массу 1 м³ влажного насыщенного пара при давлении 1,2 МПа и степени сухости $x=0,75$.

27. Найдите давление, удельный объем и плотность воды, если она находится в состоянии кипения при температуре 250°C .
28. В паровом котле находится 10 м^3 воды и 5 м^3 сухого насыщенного пара при давлении 50 бар. Определите удельный объем смеси.
29. Определите состояние и параметры (p , v , h) водяного пара, имеющего $t=20^{\circ}\text{C}$ и $s=6\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$.
30. Определите внутреннюю энергию сухого насыщенного пара при $p=10\text{ МПа}$.
31. Состояние водяного пара задано параметрами $p=10\text{ бар}$ и $v=0,0159\text{ м}^3/\text{кг}$. Определите его энтальпию и внутреннюю энергию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Чухин, И. М.** Техническая термодинамика. Ч. 1.: учеб. пособие / И.М. Чухин; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина». – Иваново, 2006. – 224 с.
2. **Александров, А. А.** Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: справочник / А.А. Александров, Б.А. Григорьев. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 168 с.
3. **Зубарев, В. Н.** Практикум по технической термодинамике: учеб. пособие для вузов / В.Н. Зубарев, А.А. Александров, В.С. Охотон. – М: Энергоатомиздат, 1986. – 304 с.
4. **Ракутина, Д. В.** Построение фазовых диаграмм воды и водяного пара: метод. указания /Д.В. Ракутина, А.В. Пекунова; ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина». – Иваново, 2021. – 32 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Варианты заданий для расчета процесса воды и водяного пара

Вариант	Процесс	Точка 1	Точка 2
1	$p = \text{const}$	$p_1 = 2,5 \text{ МПа}; t_1 = 320 \text{ }^\circ\text{C}$	$s_2 = 4 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
2	$v = \text{const}$	$p_1 = 10 \text{ МПа}; t_1 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$
3	$T = \text{const}$	$p_1 = 2 \text{ МПа}; h_1 = 3024 \text{ кДж}/\text{кг}$	$s_2 = 5,5 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
4	$s = \text{const}$	$p_1 = 8 \text{ МПа}; x_1 = 0,9$	$p_2 = 35 \text{ МПа}$
5	$p = \text{const}$	$p_1 = 3 \text{ МПа}; x_1 = 0,75$	$h_2 = 2700 \text{ кДж}/\text{кг}$
6	$v = \text{const}$	$p_1 = 8 \text{ МПа}; x_1 = 0,7$	$p_2 = 13 \text{ МПа}$
7	$T = \text{const}$	$p_1 = 2,5 \text{ МПа}; t_1 = 310 \text{ }^\circ\text{C}$	$h_2 = 2200 \text{ кДж}/\text{кг}$
8	$s = \text{const}$	$p_1 = 9 \text{ МПа}; t_1 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$	$x_2 = 1$
9	$p = \text{const}$	$p_1 = 1 \text{ МПа}; x_1 = 0,4$	$v_2 = 0,2275 \text{ м}^3/\text{кг}$
10	$v = \text{const}$	$p_1 = 7 \text{ МПа}; x_1 = 0,75$	$p_2 = 15 \text{ МПа}$
11	$T = \text{const}$	$p_1 = 2 \text{ МПа}; v_1 = 0,1334 \text{ м}^3/\text{кг}$	$s_2 = 4,5 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
12	$s = \text{const}$	$p_1 = 7 \text{ МПа}; x_1 = 0,8$	$p_2 = 22 \text{ МПа}$
13	$p = \text{const}$	$p_1 = 1 \text{ МПа}; v_1 = 0,2327 \text{ м}^3/\text{кг}$	$x_2 = 0,2$
14	$v = \text{const}$	$p_1 = 6 \text{ МПа}; x_1 = 0,72$	$p_2 = 15 \text{ МПа}$
15	$T = \text{const}$	$p_1 = 2,5 \text{ МПа}; h_1 = 3057,1 \text{ кДж}/\text{кг}$	$h_2 = 1900 \text{ кДж}/\text{кг}$
16	$s = \text{const}$	$p_1 = 6 \text{ МПа}; x_1 = 0,74$	$t_2 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$
17	$p = \text{const}$	$p_1 = 1,5 \text{ МПа}; t_1 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$	$h_2 = 2790,4 \text{ кДж}/\text{кг}$
18	$v = \text{const}$	$p_1 = 5 \text{ МПа}; x_1 = 0,64$	$t_2 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$
19	$T = \text{const}$	$p_1 = 3 \text{ МПа}; t_1 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$	$s_2 = 5 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
20	$s = \text{const}$	$p_1 = 5 \text{ МПа}; t_1 = 320 \text{ }^\circ\text{C}$	$h_2 = 2500 \text{ кДж}/\text{кг}$
21	$p = \text{const}$	$p_1 = 2 \text{ МПа}; s_1 = 6,8466 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$h_2 = 1888,8 \text{ кДж}/\text{кг}$
22	$v = \text{const}$	$p_1 = 4,5 \text{ МПа}; x_1 = 0,7$	$p_2 = 10 \text{ МПа}$
23	$T = \text{const}$	$p_1 = 3,5 \text{ МПа}; h_1 = 3128,9 \text{ кДж}/\text{кг}$	$h_2 = 2180 \text{ кДж}/\text{кг}$
24	$s = \text{const}$	$p_1 = 4 \text{ МПа}; x_1 = 0,84$	$t_2 = 450 \text{ }^\circ\text{C}$
25	$p = \text{const}$	$p_1 = 8 \text{ МПа}; h_1 = 2181,5 \text{ кДж}/\text{кг}$	$t_2 = 530 \text{ }^\circ\text{C}$
26	$v = \text{const}$	$p_1 = 1,5 \text{ МПа}; t_1 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$	$p_2 = 0,3 \text{ МПа}$
27	$T = \text{const}$	$p_1 = 4 \text{ МПа}; t_1 = 180 \text{ }^\circ\text{C}$	$x_2 = 1$
28	$s = \text{const}$	$p_1 = 8 \text{ МПа}; t_1 = 320 \text{ }^\circ\text{C}$	$p_2 = 1,5 \text{ МПа}$

Продолжение табл.

Вариант	Процесс	Точка 1	Точка 2
29	$p = \text{const}$	$p_1 = 3 \text{ МПа}; h_1 = 3115,7 \text{ кДж/кг}$	$h_2 = 1800 \text{ кДж/кг}$
30	$v = \text{const}$	$p_1 = 2 \text{ МПа}; h_1 = 3069,8 \text{ кДж/кг}$	$t_2 = 180 \text{ }^\circ\text{C}$
31	$T = \text{const}$	$p_1 = 4,5 \text{ МПа}; v_1 = 0,0543 \text{ м}^3/\text{кг}$	$p_2 = 18 \text{ МПа}$
32	$s = \text{const}$	$p_1 = 2 \text{ МПа}; x_1 = 0,77$	$p_2 = 15 \text{ МПа}$
33	$p = \text{const}$	$p_1 = 3,5 \text{ МПа}; t_1 = 370 \text{ }^\circ\text{C}$	$v_2 = 0,02 \text{ м}^3/\text{кг}$
34	$v = \text{const}$	$p_1 = 4 \text{ МПа}; x_1 = 0,65$	$p_2 = 9 \text{ МПа}$
35	$T = \text{const}$	$p_1 = 5 \text{ МПа}; s_1 = 6,4513 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$p_2 = 19 \text{ МПа}$
36	$s = \text{const}$	$p_1 = 3,5 \text{ МПа}; h_1 = 2626,2 \text{ кДж/кг}$	$h_2 = 3000 \text{ кДж/кг}$
37	$p = \text{const}$	$p_1 = 4 \text{ МПа}; v_1 = 0,07066 \text{ м}^3/\text{кг}$	$v_2 = 0,03 \text{ м}^3/\text{кг}$
38	$v = \text{const}$	$p_1 = 3,5 \text{ МПа}; h_1 = 2275,9 \text{ кДж/кг}$	$t_2 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$
39	$T = \text{const}$	$p_1 = 6 \text{ МПа}; h_1 = 2885 \text{ кДж/кг}$	$p_2 = 20 \text{ МПа}$
40	$s = \text{const}$	$p_1 = 3 \text{ МПа}; x_1 = 0,8$	$p_2 = 16 \text{ МПа}$
41	$p = \text{const}$	$p_1 = 4,5 \text{ МПа}; t_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$	$h_2 = 1900 \text{ кДж/кг}$
42	$v = \text{const}$	$p_1 = 3 \text{ МПа}; s_1 = 4,8389 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$p_2 = 7 \text{ МПа}$
43	$T = \text{const}$	$p_1 = 7 \text{ МПа}; h_1 = 3288 \text{ кДж/кг}$	$p_2 = 18 \text{ МПа}$
44	$s = \text{const}$	$p_1 = 2,5 \text{ МПа}; x_1 = 0,7$	$h_2 = 2800 \text{ кДж/кг}$
45	$p = \text{const}$	$p_1 = 5 \text{ МПа}; h_1 = 944,4 \text{ кДж/кг}$	$s_2 = 6,2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
46	$v = \text{const}$	$p_1 = 2,5 \text{ МПа}; x_1 = 0,6$	$p_2 = 4,5 \text{ МПа}$
47	$T = \text{const}$	$p_1 = 8 \text{ МПа}; v_1 = 0,02425 \text{ м}^3/\text{кг}$	$p_2 = 17 \text{ МПа}$
48	$s = \text{const}$	$p_1 = 7 \text{ МПа}; t_1 = 310 \text{ }^\circ\text{C}$	$p_2 = 2 \text{ МПа}$
49	$p = \text{const}$	$p_1 = 6 \text{ МПа}; s_1 = 6,5052 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$s_2 = 3 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
50	$v = \text{const}$	$p_1 = 2 \text{ МПа}; h_1 = 1853 \text{ кДж/кг}$	$p_2 = 5 \text{ МПа}$
51	$T = \text{const}$	$p_1 = 9 \text{ МПа}; h_1 = 1085,9 \text{ кДж/кг}$	$p_2 = 2 \text{ МПа}$
52	$s = \text{const}$	$p_1 = 3,5 \text{ МПа}; x_1 = 0,85$	$p_2 = 18 \text{ МПа}$
53	$p = \text{const}$	$p_1 = 8 \text{ МПа}; t_1 = 430 \text{ }^\circ\text{C}$	$s_2 = 4,5 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
54	$v = \text{const}$	$p_1 = 1,5 \text{ МПа}; x_1 = 0,65$	$p_2 = 4 \text{ МПа}$
55	$T = \text{const}$	$p_1 = 2 \text{ МПа}; x_1 = 0,8$	$p_2 = 1 \text{ МПа}$
56	$s = \text{const}$	$p_1 = 3 \text{ МПа}; v_1 = 0,05223 \text{ м}^3/\text{кг}$	$p_2 = 29 \text{ МПа}$
57	$p = \text{const}$	$p_1 = 9 \text{ МПа}; h_1 = 3335,7 \text{ кДж/кг}$	$h_2 = 2200 \text{ кДж/кг}$

Продолжение табл.

Вариант	Процесс	Точка 1	Точка 2
58	$v = \text{const}$	$p_1 = 2,5 \text{ МПа}; t_1 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2 = 140 \text{ }^\circ\text{C}$
59	$T = \text{const}$	$p_1 = 2,3 \text{ МПа}; h_1 = 2521,1 \text{ кДж/кг}$	$p_2 = 1,5 \text{ МПа}$
60	$s = \text{const}$	$p_1 = 6 \text{ МПа}; t_1 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$	$p_2 = 3 \text{ МПа}$
61	$p = \text{const}$	$p_1 = 1 \text{ МПа}; x_1 = 0,4$	$t_2 = 240 \text{ }^\circ\text{C}$
62	$v = \text{const}$	$p_1 = 8 \text{ МПа}; s_1 = 6,5928 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$t_2 = 220 \text{ }^\circ\text{C}$
63	$T = \text{const}$	$p_1 = 1,5 \text{ МПа}; x_1 = 0,8$	$p_2 = 0,5 \text{ МПа}$
64	$s = \text{const}$	$p_1 = 5 \text{ МПа}; h_1 = 2892,4 \text{ кДж/кг}$	$h_2 = 2600 \text{ кДж/кг}$
65	$p = \text{const}$	$p_1 = 1,5 \text{ МПа}; v_1 = 0,0403 \text{ м}^3/\text{кг}$	$h_2 = 3200 \text{ кДж/кг}$
66	$v = \text{const}$	$p_1 = 8 \text{ МПа}; t_1 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2 = 180 \text{ }^\circ\text{C}$
67	$T = \text{const}$	$p_1 = 2,5 \text{ МПа}; h_1 = 2525 \text{ кДж/кг}$	$p_2 = 2 \text{ МПа}$
68	$s = \text{const}$	$p_1 = 4,5 \text{ МПа}; t_1 = 280 \text{ }^\circ\text{C}$	$x_2 = 1$
69	$p = \text{const}$	$p_1 = 2 \text{ МПа}; s_1 = 5,5592 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$t_2 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$
70	$v = \text{const}$	$p_1 = 7 \text{ МПа}; h_1 = 3212,1 \text{ кДж/кг}$	$p_2 = 3,5 \text{ МПа}$
71	$T = \text{const}$	$p_1 = 2 \text{ МПа}; x_1 = 0,9$	$p_2 = 1,5 \text{ МПа}$
72	$s = \text{const}$	$p_1 = 4 \text{ МПа}; t_1 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$	$p_2 = 2 \text{ МПа}$
73	$p = \text{const}$	$p_1 = 2,5 \text{ МПа}; h_1 = 2341,1 \text{ кДж/кг}$	$h_2 = 3506 \text{ кДж/кг}$
74	$v = \text{const}$	$p_1 = 6 \text{ МПа}; t_1 = 480 \text{ }^\circ\text{C}$	$p_2 = 3,5 \text{ МПа}$
75	$T = \text{const}$	$p_1 = 2,5 \text{ МПа}; h_1 = 2433 \text{ кДж/кг}$	$p_2 = 1,5 \text{ МПа}$
76	$s = \text{const}$	$p_1 = 3,5 \text{ МПа}; h_1 = 2828,1 \text{ кДж/кг}$	$p_2 = 1,5 \text{ МПа}$
77	$p = \text{const}$	$p_1 = 6 \text{ МПа}; x_1 = 0,62$	$h_2 = 3204 \text{ кДж/кг}$
78	$v = \text{const}$	$p_1 = 3 \text{ МПа}; h_1 = 3185,8 \text{ кДж/кг}$	$p_2 = 1 \text{ МПа}$
79	$T = \text{const}$	$p_1 = 8 \text{ МПа}; x_1 = 0,5$	$p_2 = 2,5 \text{ МПа}$
80	$s = \text{const}$	$p_1 = 3 \text{ МПа}; h_1 = 3068,2 \text{ кДж/кг}$	$x_2 = 1$
81	$p = \text{const}$	$p_1 = 3,5 \text{ МПа}; v_1 = 0,0414 \text{ м}^3/\text{кг}$	$t_2 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$
82	$v = \text{const}$	$p_1 = 5 \text{ МПа}; t_1 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$
83	$T = \text{const}$	$p_1 = 3 \text{ МПа}; v_1 = 0,05681 \text{ м}^3/\text{кг}$	$p_2 = 1,5 \text{ МПа}$
84	$s = \text{const}$	$p_1 = 2,5 \text{ МПа}; t_1 = 310 \text{ }^\circ\text{C}$	$h_2 = 2600 \text{ кДж/кг}$
85	$p = \text{const}$	$p_1 = 4 \text{ МПа}; x_1 = 0,68$	$s_2 = 2,135 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$
86	$v = \text{const}$	$p_1 = 4,5 \text{ МПа}; h_1 = 3055,3 \text{ кДж/кг}$	$t_2 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$

Окончание табл.

Вариант	Процесс	Точка 1	Точка 2
87	$T = \text{const}$	$p_1 = 3,5 \text{ МПа}; h_1 = 2626,2 \text{ кДж/кг}$	$p_2 = 1 \text{ МПа}$
88	$s = \text{const}$	$p_1 = 2,5 \text{ МПа}; v_1 = 0,09665 \text{ м}^3/\text{кг}$	$p_2 = 1 \text{ МПа}$
89	$p = \text{const}$	$p_1 = 4,5 \text{ МПа}; h_1 = 2126,8 \text{ кДж/кг}$	$h_2 = 3370 \text{ кДж/кг}$
90	$v = \text{const}$	$p_1 = 1 \text{ МПа}; x_1 = 0,5$	$p_2 = 3,5 \text{ МПа}$
91	$T = \text{const}$	$p_1 = 4 \text{ МПа}; h_1 = 2457 \text{ кДж/кг}$	$x_2 = 1$
92	$s = \text{const}$	$p_1 = 3,5 \text{ МПа}; t_1 = 330 \text{ }^\circ\text{C}$	$h_2 = 2400 \text{ кДж/кг}$
93	$p = \text{const}$	$p_1 = 5 \text{ МПа}; x_1 = 0,64$	$s_2 = 2,23 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
94	$v = \text{const}$	$p_1 = 3,5 \text{ МПа}; t_1 = 390 \text{ }^\circ\text{C}$	$p_2 = 1 \text{ МПа}$
95	$T = \text{const}$	$p_1 = 4,5 \text{ МПа}; x_1 = 0,75$	$p_2 = 2 \text{ МПа}$
96	$s = \text{const}$	$p_1 = 5 \text{ МПа}; x_1 = 0,65$	$x_2 = 1$
97	$p = \text{const}$	$p_1 = 6 \text{ МПа}; v_1 = 0,0237 \text{ м}^3/\text{кг}$	$s_2 = 6,5812 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
98	$v = \text{const}$	$p_1 = 3 \text{ МПа}; t_1 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$	$p_2 = 1 \text{ МПа}$
99	$T = \text{const}$	$p_1 = 7 \text{ МПа}; x_1 = 0,7$	$p_2 = 2 \text{ МПа}$
100	$s = \text{const}$	$p_1 = 5 \text{ МПа}; x_1 = 0,8$	$t_2 = 420 \text{ }^\circ\text{C}$

Содержание

Требования по технике безопасности	3
1. Цель работы.....	4
2. Основные теоретические положения	5
2.1. Вода. Основные понятия, фазовые состояния и процессы её фазовых переходов	5
2.2. Фазовые диаграммы p,t - и p,v - для воды и пара.....	6
2.3. Расчет изохорного процесса нагрева воды.....	8
3. Описание экспериментальной установки	11
4. Проведение опыта	13
4.1. Инструкция для пользователя программой	13
4.2. Порядок проведения опыта	16
5. Обработка результатов эксперимента	17
6. Графическое изображение процесса водяного пара в p,v , T,s и h,s диаграммах	22
7. Требования к оформлению отчета	23
Контрольные вопросы для отчета по работе	24
Библиографический список	26
Приложение.....	27

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ДАВЛЕНИЕМ
И ТЕМПЕРАТУРОЙ НАСЫЩЕННЫХ ВОДЯНЫХ ПАРОВ
ПРИ ИММИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Составители: ЧУХИН Иван Михайлович
ПЕКУНОВА Анна Витальевна
РАКУТИНА Дарья Валериевна

Редактор С.М. Комкова

Подписано в печать . . . 2022 г. Формат 60×84 1/16.
Печать плоская. Усл. печ. л. 1,85. Тираж 300 экз. Заказ №
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.