

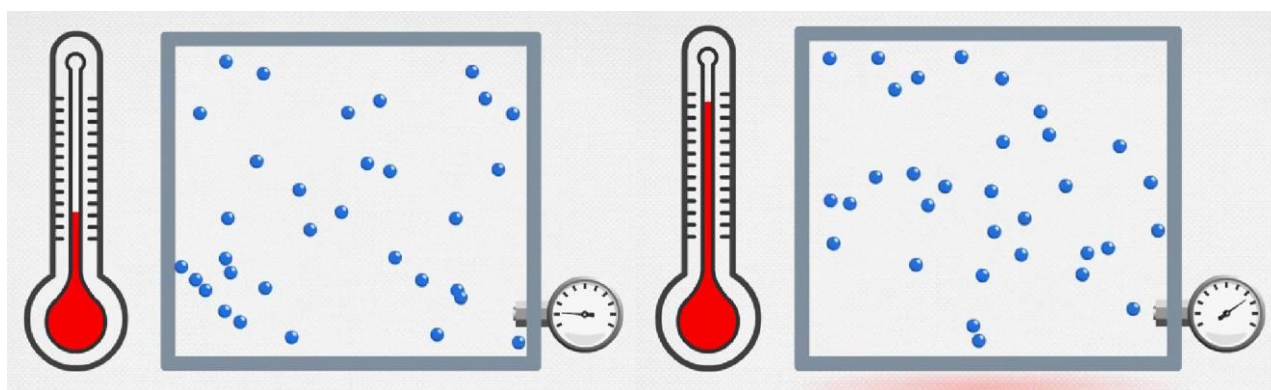
МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Чащинов В.И., Михайличенко С.М., Купреенко А.И., Исаев Х.М.

Т Е П Л О Ф И З И К А

Методические указания
для выполнения лабораторных работ

Часть I



Брянская область, 2022

УДК 536.2 (076)

ББК 22.317

Т 34

Теплофизика. Лабораторные работы. Ч. I: методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Теплофизика» для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность / В. И. Чащинов, С. М. Михайличенко, А. И. Купреенко, Х. М. Исаев. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2022. — 36 с.

Методические указания включают в себя лабораторные работы, посвященные исследованию свойств водяного пара и влажного воздуха. Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность.

Рецензент:

А.М. Случевский – к.т.н., доцент кафедры технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве.

Рекомендовано к изданию решением учебно-методической комиссии инженерно-технологического института от 28 сентября 2022 г., протокол № 1.

© Брянский ГАУ, 2022

© Чащинов В.И., 2022

© Михайличенко С.М., 2022

© Купреенко А.И., 2022

© Исаев Х.М., 2022

Оглавление

Предисловие.....	5
<i>Лабораторная работа № 1</i>	6
Определение параметров влажного пара методом дросселирования.....	6
<i>Лабораторная работа № 2</i>	19
Исследование процессов во влажном воздухе	19
Список литературы.....	32
Приложение 1 – Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения	33
Приложение 2 – Термодинамические свойства воды и перегретого пара	34
Приложение 3 – Давление насыщения водяного пара (по температуре)	35

Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля):

ОПК-1: Способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека;

Материалы, изложенные в данных методических указаниях, будут способствовать формированию указанной компетенции в результате освоения дисциплины «Теплофизика».

Предисловие

Данные учебно-методические указания предназначены для проведения лабораторных занятий по дисциплине «Теплофизика» со студентами очной и заочной форм обучения направления подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность. Они включают в себя две лабораторные работы, посвященные изучению свойств водяного пара и влажного воздуха.

Каждая лабораторная работа сопровождается необходимым справочным материалом, подробными пояснениями для ее выполнения. Целью данных работ является закрепление знаний студентов, полученных на лекционных занятиях по данным темам, а также развитие навыков применения расчетных формул, таблиц, диаграмм для решения практических задач.

На выполнение каждой работы отводится по два лабораторных занятия. Отчет по работе оформляется в тетради согласно приведенному порядку выполнения работы. Оформленная работа представляется к защите.

Лабораторная работа № 1

Определение параметров влажного пара методом дросселирования

1. Цель работы

Определить параметры пара в котле по результатам измерения параметров пара за дросселем с использованием диаграммы $i-s$ водяного пара, а так же расчетных формул и таблиц. Закрепить знание диаграммы $i-s$ водяного пара и умение пользоваться ею для решения практических задач.

2. Краткие сведения о паре и процессе дросселирования

Водяной пар широко применяется в различных отраслях промышленности главным образом в качестве теплоносителя в теплообменных аппаратах и как рабочее тело в паросиловых установках (например, на электростанциях).

Жидкость может превращаться в пар путем *испарения* либо *кипения*.

Испарением называется процесс парообразования, происходящего только с поверхности жидкости при любой температуре. При сообщении жидкости теплоты повышается ее температура и, соответственно, интенсивность испарения. При определенной температуре, зависящей от природы жидкости и ее давления, начинается парообразование во всей ее массе. Этот процесс называется **кипением**.

Различают три вида пара: *сухой насыщенный*, *перегретый* и *влажный насыщенный*.

Сухим насыщенным (насыщенным) называется пар, в котором отсутствует жидкая фаза, а его температура равна температуре кипения (насыщения) для данного давления.

Перегретым является пар, температура которого выше температуры сухого насыщенного пара того же давления. Разность между температурой перегретого пара и сухого насыщенного называется **степенью перегрева пара**.

Влажным называется пар, который получается при неполном испарении

жидкости, т.е. это смесь сухого насыщенного пара и кипящей жидкости. Влажный пар характеризуется степенью сухости x , которая представляет собой массовую долю сухого насыщенного пара во влажном:

$$x = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{п}} + m_{\text{ж}}}, \quad (1.1)$$

где

$m_{\text{п}}$ – масса сухого насыщенного пара в смеси;

$m_{\text{ж}}$ – масса кипящей жидкости в смеси;

$m_{\text{п}} + m_{\text{ж}}$ – масса смеси (влажного пара).

Например, при $x = 0,8$ (80 %) во влажном паре будет находиться 80 % насыщенного пара и 20 % кипящей жидкости.

Для перехода из жидкого состояния в пар необходимо затратить определенное количество теплоты. Процесс парообразования происходит при кипении жидкости, и если он осуществляется при неизменном давлении, то одновременно является изотермическим процессом. Температура кипения (насыщения) зависит от рода жидкости и от величины давления.

Удельная теплота парообразования r (кДж/кг) – количество теплоты, необходимое для перевода 1 кг кипящей жидкости в сухой насыщенный пар при постоянных температуре и давлении.

При увеличении давления температура кипения воды повышается, при уменьшении давления – снижается. Например, при пониженном давлении 0,1 бар вода закипает при температуре 44,83 °С, при пониженном давлении 0,5 бар – при температуре 81,35 °С, при обычном атмосферном давлении 1 бар – при температуре 99,63 °С, при повышенном давлении 10 бар – при температуре 179,88 °С.

Одним из важнейших параметров пара как рабочего тела является его энтальпия.

Удельная энтальпия сухого насыщенного пара i'' (кДж/кг) определяется по формуле:

$$i'' = i' + r, \quad (1.2)$$

где

i' – удельная энтальпия кипящей воды, кДж/кг;

r – удельная теплота парообразования, кДж/кг .

Удельная энтальпия влажного пара i_x (кДж/кг):

$$i_x = i' + x \cdot r, \quad (1.3)$$

где

i' – удельная энтальпия кипящей воды, кДж/кг;

x – степень сухости пара, $x = 0 \dots 1$;

r – теплота парообразования, кДж/кг.

На основании выражения (1.3) можно получить формулу для вычисления степени сухости влажного пара:

$$x = \frac{i_x - i'}{r}. \quad (1.4)$$

В инженерных расчетах, когда рабочим телом является водяной пар, довольно широко применяется диаграмма $i-s$ пара (рис. 1.1). С ее помощью по положению точки, соответствующей определенному состоянию пара, можно легко определить значения всех параметров этого пара (p, v, t, i, s). Для этого достаточно знать значения двух любых параметров из перечисленных (обычно это давление p и температура t). Удельная внутренняя энергия определяется по формуле:

$$u = i - pv, \quad (1.5)$$

где

i – удельная энтальпия пара, кДж/кг;

p – давление пара, Па;

v – удельный объем, кг/м³.

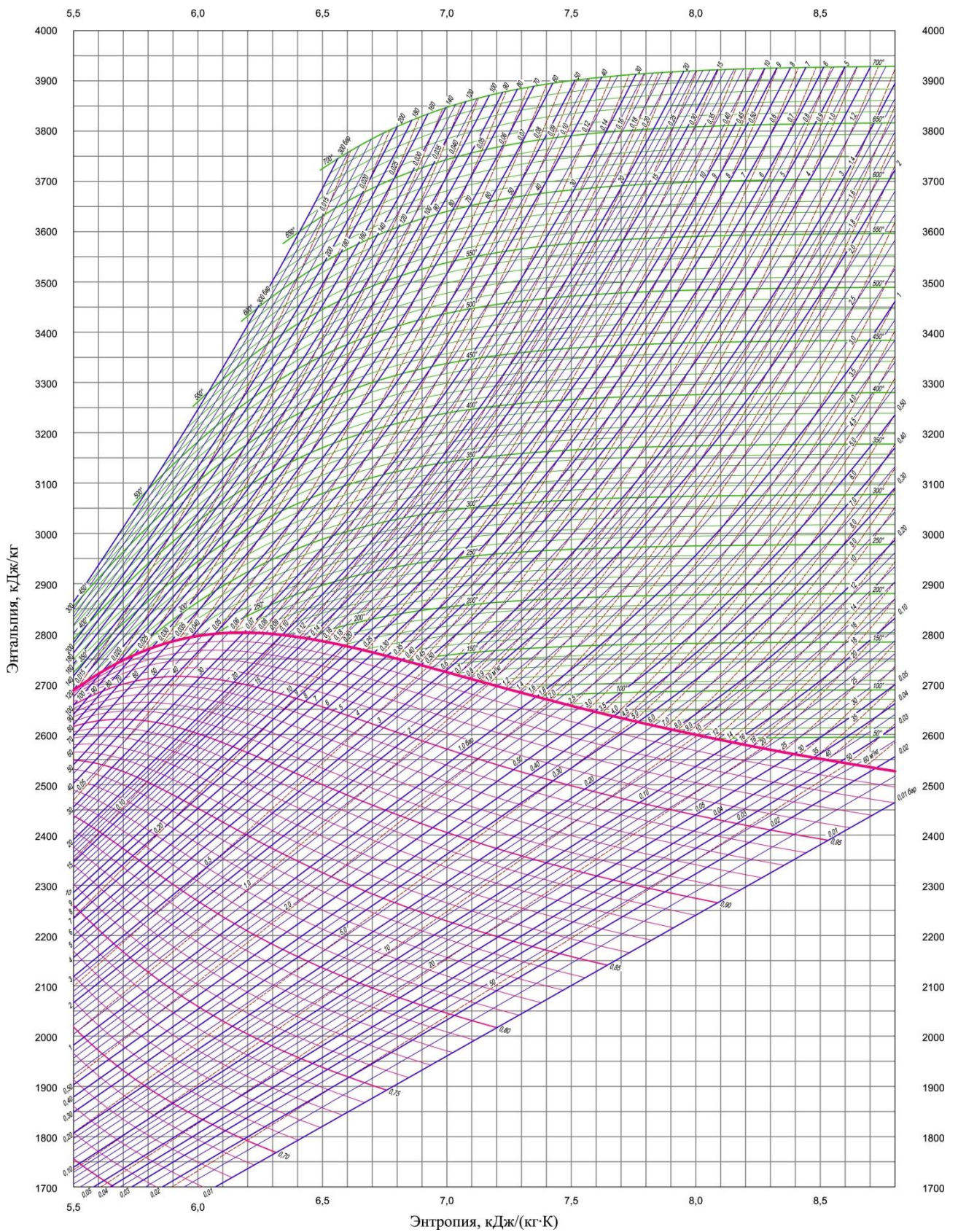


Рисунок 1.1 – Диаграмма i - s для водяного пара

На диаграмме утолщенная красная линия соответствует сухому насыщенному пару ($x = 1$). Область, находящаяся ниже этой линии, соответствует влажному пару, а область выше – перегретому пару.

Также на диаграмме (рис. 1.2) представлено семейство изобар (синих линий постоянного давления $p = const$), изохор (красных пунктирных линий постоянного удельного объема $v = const$), изотерм (зеленых линий постоянных температур $t = const$) в области перегретого пара и красных линий постоянной степени сухости в области влажного пара ($x = const$). Вертикальные и горизонтальные линии относятся соответственно к энтропии и энтальпии.

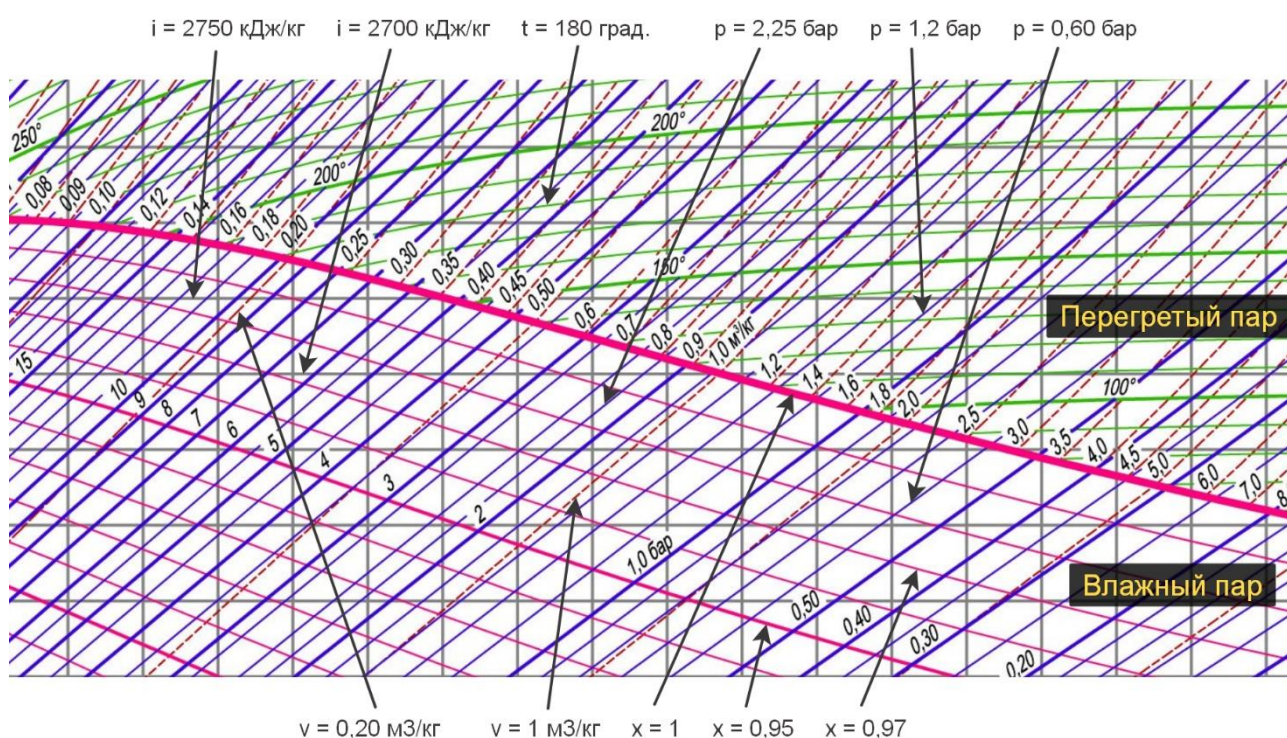


Рисунок 1.2 – Фрагмент i - s диаграммы водяного пара

Для удобства работы с диаграммой подписи значений параметров могут дублироваться, при этом они имеют такой же наклон, как и соответствующие им линии.

При определении температуры влажного пара по диаграмме необходимо помнить, что его температура не зависит от степени сухости, т.е. от состояния кипящей воды ($x = 0$) до состояния сухого насыщенного пара ($x = 1$) при постоянном давлении температура пара не меняется и соответствует температуре

насыщения t_n . Таким образом, достаточно найти точку пересечения соответствующей изобары и линии $x = 1$ и определить, какая изотерма приходит в эту точку. Например, давлению 1 бар соответствует $t_n \approx 100$ °С (99,63 °С по таблице), давлению 5 бар – $t_n \approx 152$ °С (151,85 °С по таблице).

Для определения остальных параметров необходимо найти точку, характеризующую состояние пара, например: влажный пар при давлении $p = 7$ бар и степени сухости $x = 0,97$ имеет следующие показатели: $t_n \approx 167$ °С, $i \approx 2700$ кДж/кг, $s \approx 6,57$ кДж/кг·К, $v \approx 0,27$ м³/кг.

В том случае, если в адиабатном процессе (без потерь энергии, т.е. при постоянной энтальпии) снизить давление этого пара до значения $p_2 = 0,5$ бар, он окажется перегретым и будет иметь следующие показатели: $t \approx 109$ °С, $t_n \approx 82$ °С, $i \approx 2700$ кДж/кг, $s \approx 7,74$ кДж/кг·К, $v \approx 3,5$ м³/кг.

Пользуясь диаграммой, несложно определить количество теплоты q и работу l в процессах:

Изохорный: $q_v = \Delta u = u_2 - u_1$; $l_v = 0$.

Изобарный: $q_p = i_2 - i_1$; $l_p = p \cdot (v_2 - v_1)$.

Изотермический: $q_t = T \cdot (s_2 - s_1)$; $l_t = q_t - \Delta u_t$; $\Delta u_t \neq 0$, т.к. оно связано с дисгрегацией молекул.

Адиабатный: $q = 0$; $l = -\Delta u = u_1 - u_2$.

Дросселирование – процесс снижения давления при прохождении газом (паром) местного сужения канала (местного сопротивления) без совершения внешней работы. Дросселирование является необратимым процессом. Обычно теплообменом с окружающей средой при дросселировании пренебрегают и считают процесс адиабатным.

При адиабатном дросселировании энтальпия сохраняет свое значение, то есть $i_1 = i_2$. Именно это обстоятельство используется в данной работе для определения параметров пара в котле.

При этом дросселирование нельзя отождествлять с изоэнтальпийным процессом, поскольку при непосредственном прохождении местного сопротивле-

ния энтальпия претерпевает изменения, но ее значение восстанавливается после дросселя. Давление в результате дросселирования снижается по определению, удельный объем возрастает, а температура может увеличиваться, уменьшаться или оставаться неизменной. Дросселирование является типичным необратимым процессом, при котором всегда происходит увеличение энтропии, и работоспособность рабочего тела уменьшается.

3. Описание лабораторной установки. Методика проведения измерений

Для выполнения данной работы используется лабораторная установка, схема которой изображена на рисунке 1.3.

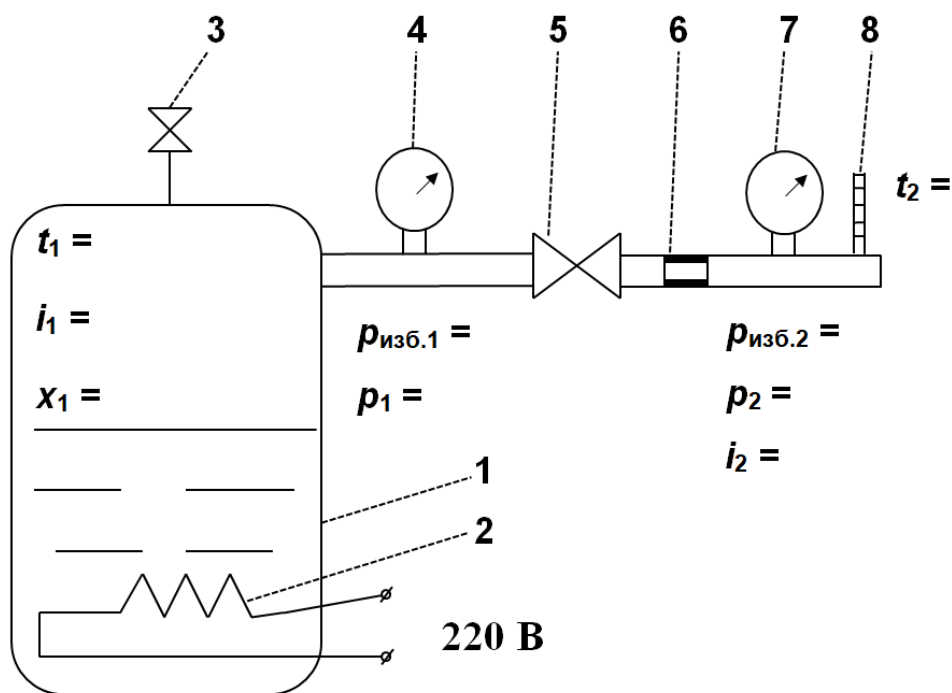


Рисунок 1.3 – Схема лабораторной установки:

1 – паровой котел; 2 – теплоэлектронагреватель (ТЭН); 3 предохранительный клапан; 4,7 – манометры; 5 – кран; 6 – дроссель; 8 – термометр

Для снятия показаний необходимо выполнить следующие действия:

1. Проверить наличие воды в котле по водомерному стеклу (должно быть не менее половины уровня). Закрывать кран 5 и включить электронагреватель 2.

2. При достижении давления 3...4 кгс/см² по показаниям манометра 4 открыть кран 5. При установившемся режиме (когда показания термометра 8 стабилизируются), зафиксировать и занести в таблицу 1.2 значения следующих параметров:

t_2 – температура пара за дросселем, °С;

$p_{\text{изб.1}}$ – избыточное давления пара в котле (по манометру 4), кгс/см²;

$p_{\text{изб.2}}$ – избыточное давление пара за дросселем (по манометру 7), кгс/см²;

3. Закрыть кран 5. Выключить электронагреватель 2.

4. Измерить с помощью барометра атмосферное давление B (мм рт.ст.). Занести показания в таблицу 1.2.

Поскольку работа с паром, особенно под высоким давлением, представляет собой определенную опасность, данная работа выполняется на основании уже измеренных значений параметров t_2 , $p_{\text{изб.1}}$ и $p_{\text{изб.2}}$ (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Исходные данные для выполнения лабораторной работы

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_2 , °С	111	114	118	112	115	119	126	117	115	116
$p_{\text{изб.1}}$, ат	2,35	2,6	2,95	2,4	2,75	3,05	3,1	2,95	3,2	3,05
$p_{\text{изб.2}}$, ат	0,12	0,15	0,16	0,13	0,16	0,17	0,18	0,15	0,19	0,17
Вар. №	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
t_2 , °С	114	109	114	119	115	112	116	118	113	118
$p_{\text{изб.1}}$, ат	3,25	2,2	2,8	3,25	3,05	2,8	2,55	2,9	3,1	3,4
$p_{\text{изб.2}}$, ат	0,13	0,12	0,16	0,18	0,15	0,13	0,13	0,16	0,14	0,17

4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями. Письменно ответить на контрольные вопросы (п. 6).

2. Привести схему лабораторной установки. Ознакомиться с ее описанием.

3. Пользуясь исходными данными, расчетными формулами, справочными таблицами и i - s диаграммой, заполнить таблицы 1.2 и 1.3. Привести результаты расчетов.

Таблица 1.2 – Результаты показаний приборов

<i>B</i>	<i>p</i>_{изб.1}	<i>p</i>_{изб.2}	<i>t</i>₂
_____ мм рт.ст.	_____ ат	_____ ат	_____ °С
_____ бар	_____ бар	_____ бар	

Таблица 1.3 – Результаты определения параметров пара

Параметр	Обозначение и размерность	Значение	
		по <i>i-s</i> диаграмме	по таблицам и расчету
Абсолютное давление пара в котле	p_1 , бар		
Абсолютное давление пара за дросселем	p_2 , бар		
Энтальпия пара за дросселем	i_2 , кДж/кг		
Энтальпия пара в котле	i_1 , кДж/кг		
Энтальпия кипящей воды в котле	i_1' , кДж/кг	—	
Теплота парообразования	r_1 , кДж/кг	—	
Температура пара в котле	t_1 , °С		
Степень сухости пара в котле	x_1		

4. Схематично изобразить *i-s* диаграмму (рис. 1.4) и указать значения параметров, полученных с ее помощью.

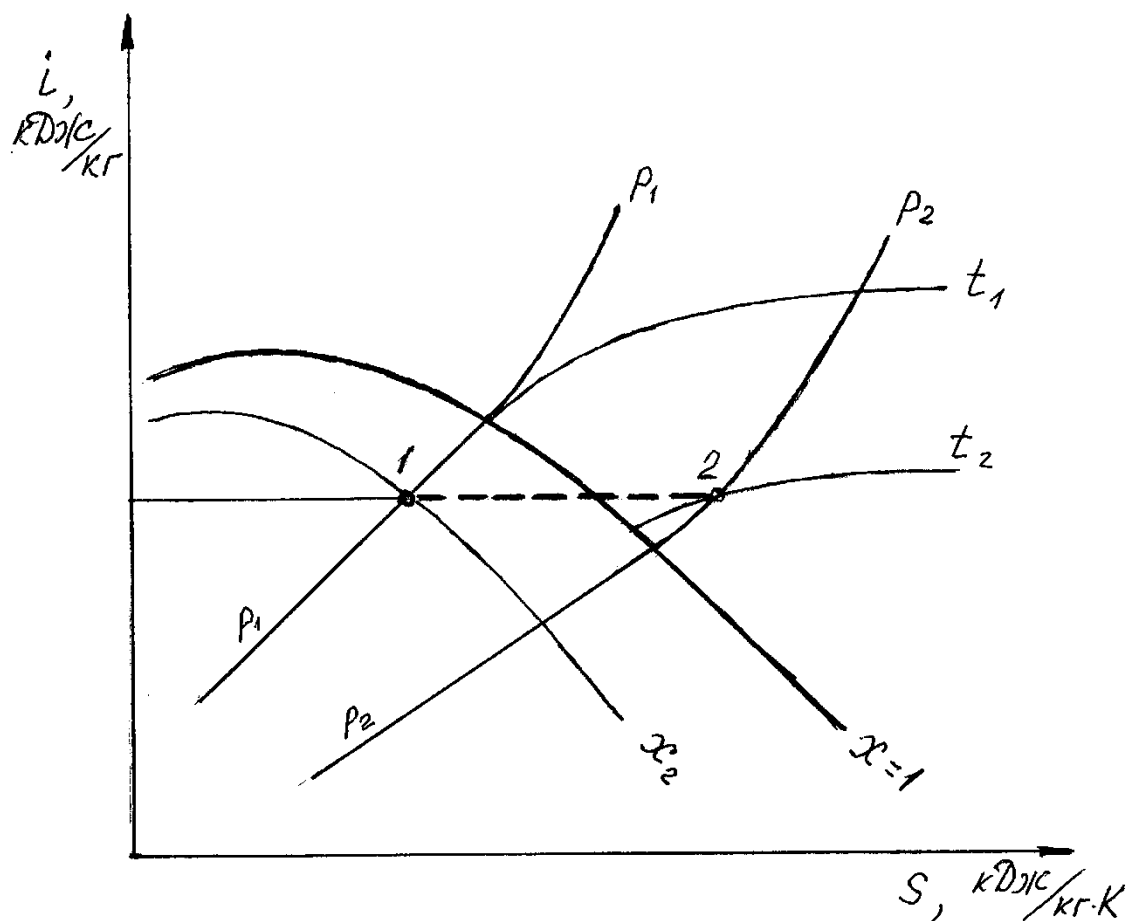


Рисунок 1.4 – Иллюстрация определения параметров влажного пара методом дросселирования по i - s диаграмме:

1-2 – процесс дросселирования

5. Подготовиться к ответам на дополнительные контрольные вопросы (п. 7).

5. Пояснения для выполнения работы

Необходимо принимать во внимание, что в таблицах и диаграмме приводятся значения абсолютного давления. При имеющихся показаниях манометров абсолютное давление может быть вычислено по формуле:

$$p_{\text{абс}} = p_i = B + p_{\text{изб.}i},$$

где

$p_{\text{изб.}i}$ – избыточное давление по показаниям i -го манометра;

B – атмосферное давление по показаниям барометра.

Заполнение столбца "по таблицам и расчету"

Энтальпия перегретого пара за дросселем i_2 определяется по значениям параметров p_2 и t_2 с помощью таблиц для перегретого пара (приложение 2).

При определении энтальпии влажного пара в котле i_1 следует учитывать, что при адиабатном дросселировании энтальпия сохраняет то значение, которое имел пар перед дросселем. То есть энтальпия пара в котле i_1 равна энтальпии пара за дросселем i_2 .

Значения температуры кипения (насыщения) t_1 , энтальпии кипящей воды i_1' и теплоты парообразования r_1 для соответствующего давления в котле p_1 определяются по таблицам для пара и воды в состоянии насыщения (приложение 1).

Степень сухости пара x_1 определяется с точностью до тысячных по формуле, полученной на основании формулы (1.4); при этом следует учитывать, что пар в котле является влажным, т.е. его энтальпия $i_1 = i_x$:

$$x = \frac{i_1 - i_1'}{r_1}, \quad (1.6)$$

где

i_1 – удельная энтальпия влажного пара в котле, кДж/кг;

i_1' – удельная энтальпия кипящей воды, кДж/кг;

r_1 – удельная теплота парообразования, кДж/кг.

Заполнение столбца "по диаграмме"

Чтобы определить значения параметров пара в котле (i_1, t_1, x_1) с использованием i - s диаграммы необходимо найти точку, характеризующую состояние этого пара (точка 1, рис. 1.4). Для этого по известным значениям параметров p_2 и t_2 находится положение точки 2 (рис. 1.4), характеризующей состояние пара за дросселем, а затем определяется энтальпия i_2 .

Поскольку в процессе дросселирования $i_1 = i_2$, точку 1 находим по известным значениям параметров i_2 и p_1 . Ниже на рисунке представлены значения, полученные для произвольно выбранной точки, характеризующей состояние влажного пара.

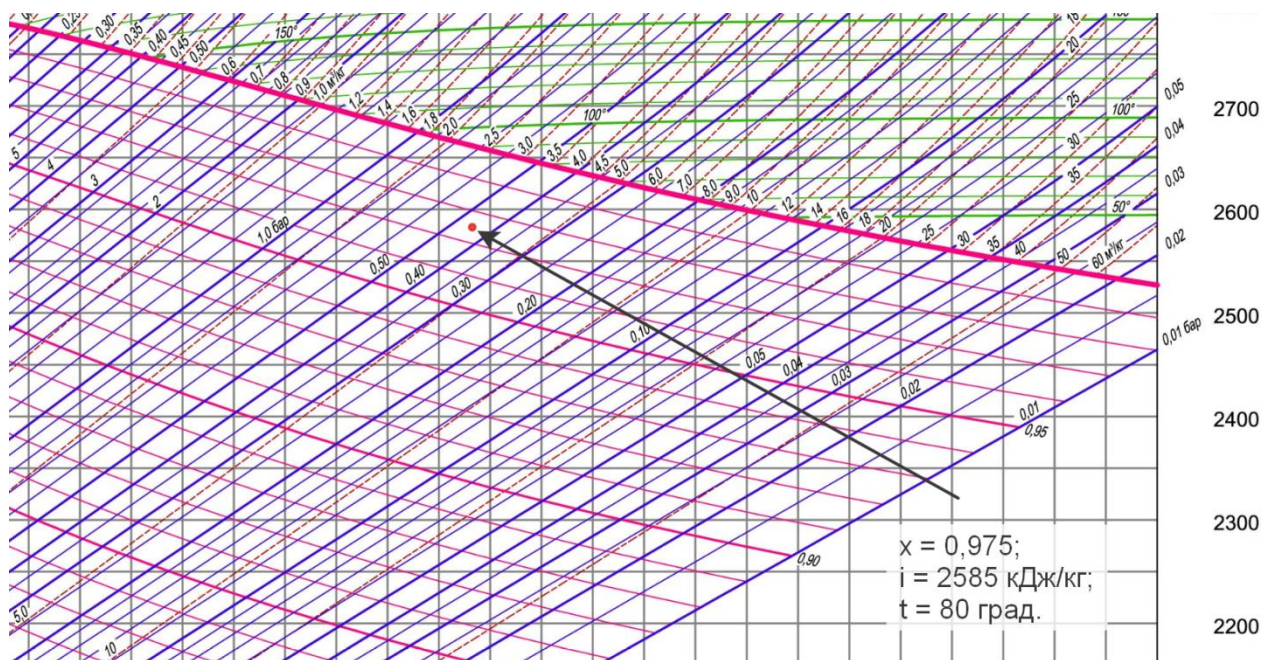


Рисунок 1.5 – Фрагмент i - s диаграммы для водяного пара

6. Тестовые контрольные вопросы

1. Перечислите виды пара.
2. Что называется сухим насыщенным паром?
3. Что называется перегретым паром?
4. Что называется влажным паром?
5. Что называется степенью сухости пара?
6. Что называется теплотой парообразования?
7. Как изменяется температура кипения от величины давления?
8. Как зависит температура влажного пара от степени сухости?
9. Как изменяется степень сухости пара при подводе теплоты?
10. Как определяется абсолютное давление по показаниям манометра?
11. По какой формуле можно рассчитать степень сухости влажного пара?
12. Как рассчитывается энтальпия влажного пара?
13. Что называется процессом дросселирования?
14. Перечислите параметры, характеризующие состояние влажного пара.
15. Какое количество влаги в граммах содержится в 2-х кг влажного пара со степенью сухости $x = 0,8$?

16. Каким образом с использованием диаграммы $i-s$ можно определить внутреннюю энергию пара?

7. Дополнительные контрольные вопросы

17. Каким образом по диаграмме $i-s$ пара можно определить температуру кипения воды?

18. Используя диаграмму $i-s$, определить давление, соответствующее определенной температуре кипения (по указанию преподавателя).

19. Определить количество теплоты, необходимое для превращения влажного пара с заданной температурой и степенью сухости в сухой насыщенный пар (по указанию преподавателя).

20. Определить количество теплоты, необходимое для превращения влажного пара с заданными параметрами в изобарном процессе в сухой перегретый пар с заданной температурой (по указанию преподавателя).

21. Определить количество теплоты, необходимое для превращения влажного пара с заданными параметрами в изотермическом процессе в перегретый пар с заданным давлением (по указанию преподавателя).

22. Опишите устройство лабораторной установки и порядок проведения лабораторного опыта.

Лабораторная работа № 2

Исследование процессов во влажном воздухе

1. Цель работы

Установить, как изменяются параметры влажного воздуха в процессах нагрева и увлажнения (сушки). Закрепить знания диаграммы $i-d$ влажного воздуха и умение пользоваться ею для определения параметров влажного воздуха и решения практических задач, связанных с использованием влажного воздуха.

2. Краткие сведения о влажном воздухе

Влажным воздухом называют смесь сухого воздуха (всех компонентов, входящих в воздух, за исключением водяного пара) и водяного пара.

Основными параметрами, характеризующими влажный воздух, являются абсолютная и относительная влажность, влагосодержание и влагоемкость, парциальное давление водяного пара и энтальпия влажного воздуха.

Пар, содержащийся в воздухе, может быть *сухим насыщенным* или *перегретым*.

Если пар в воздухе является *сухим насыщенным*, то и воздух является *насыщенным*. Такой воздух содержит максимальное количество водяного пара для данной температуры и давления, а его относительная влажность $\varphi = 100 \%$.

Если пар в воздухе является *перегретым*, то такой воздух называют *ненасыщенным* ($\varphi < 100 \%$).

Абсолютная влажность $\rho_{\text{п}}$ (г/м^3 или кг/м^3) – это масса пара, которая содержится в 1 м^3 влажного воздуха. Абсолютная влажность равна плотности пара при его парциальном давлении и температуре воздуха. Для насыщенного воздуха определяется по таблицам для *насыщенного водяного пара*, для ненасыщенного воздуха – по таблицам для *перегретого водяного пара*.

Относительная влажность φ – это отношение абсолютной влажности ненасыщенного воздуха $\rho_{\text{п}}$ при данной температуре к абсолютной влажности насыщенного воздуха $\rho_{\text{н}}$ при той же температуре. Измеряется в долях или в процентах (например, $\varphi = 1 = 100 \%$):

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} \approx \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} \cdot 100 \approx \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}} \cdot 100. \quad (2.1)$$

где

$p_{\text{п}}$ – парциальное давление водяного пара в воздухе;

$p_{\text{н}}$ – парциальное давление насыщенного водяного пара в насыщенном воздухе ($\varphi = 1$), т.е. это максимально возможное значение $p_{\text{п}}$ при температуре влажного воздуха. Значение $p_{\text{н}}$ определяется по таблицам для *насыщенного водяного пара*.

Относительная влажность может быть найдена с помощью психрометрических таблиц или *i-d* диаграммы по показаниям прибора, называемого *психрометром*. Он состоит из двух термометров, один из которых *сухой*, а другой обернут влажной тканью (*мокрый*). Показания *мокрого* термометра в ненасыщенном воздухе ($\varphi < 1$) окажутся ниже, поскольку с него будет испаряться влага, что потребует затрат теплоты. Чем меньше относительная влажность воздуха, тем больше разница показаний *сухого* и *мокрого* термометров. В насыщенном воздухе, то есть при относительной влажности 100 %, испарения с *мокрого* термометра не происходит, и показания обоих термометров будут совпадать.

Влагосодержание d (г/кг с.в.) – это масса пара, которая приходится на 1 кг сухого воздуха:

$$d = 622 \cdot \frac{p_{\text{п}}}{B - p_{\text{п}}} = 622 \cdot \frac{\varphi p_{\text{н}}}{B - \varphi p_{\text{н}}}, \quad \frac{\text{г}}{\text{кг с. в.}}. \quad (2.2)$$

Значение относительной влажности φ в выражении (2.2) указывается в долях ($\varphi = 0 \dots 1$); значения $p_{\text{н}}$ и атмосферного давления B – в любых одинаковых единицах измерения, поскольку они взаимно сокращаются.

Влагоемкость d_{max} (г/кг с.в.) – это максимальное для данной температуры влагосодержание (при $\varphi = 1$):

$$d_{max} = 622 \cdot \frac{p_H}{B - p_H}, \frac{\Gamma}{\text{кг с. в.}} \quad (2.3)$$

Парциальным давлением водяного пара называется та часть от общего давления влажного воздуха B , которая создается этим паром. Иными словами, это давление, которое установилось бы в определенном объеме воздуха (например, в замкнутом сосуде) при неизменной температуре, если из воздуха удалить все компоненты, кроме водяного пара (см. лекцию "Смеси идеальных газов").

При известном значении влагосодержания влажного воздуха парциальное давление пара в нем можно рассчитать по формуле, полученной на основании формулы (2.2):

$$p_{\Pi} = B \cdot \frac{d}{d + 622} \quad (2.4)$$

Точка росы t_p ($^{\circ}\text{C}$) – это температура, до которой нужно охладить воздух при $p = const$, чтобы он стал насыщенным ($\varphi = 1$). При дальнейшем снижении температуры пар начнет конденсироваться в виде тумана (росы). Таким образом можно снизить влагосодержание воздуха, например, при его кондиционировании.

Удельная энтальпия влажного воздуха $i_{\text{вл.в.}}$ (кДж/кг с.в.) относится к 1 кг сухого воздуха и широко используется при расчетах сушильных установок, например, для определения количества теплоты, расходуемой на испарение влаги из подсушиваемых материалов:

$$i_{\text{вл.в.}} = t + \frac{d}{1000} \cdot (2501 + 1,93 \cdot t), \quad (2.5)$$

где

d – влагосодержание (г/кг с.в.);

t – температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$).

В основе расчета параметров влажного воздуха по показаниям «сухого» и

«мокрого» термометра лежит то обстоятельство, что в зоне «мокрого» термометра воздух является насыщенным, и его влагосодержание равно влагоемкости при температуре «мокрого» термометра, а энтальпия, несмотря на разницу температур, будет одинакова за счет большего влагосодержания, то есть $i_c = i_m$. Развернутое выражение этого условия имеет вид:

$$t_c + \frac{d}{1000} \cdot (2501 + 1,93 \cdot t_c) = t_m + \frac{d_{max.m}}{1000} \cdot (2501 + 1,93 \cdot t_m) \quad (2.6)$$

Из этого выражения можно вычислить влагосодержание воздуха, зная показания *сухого* и *мокрого* термометров:

$$d = \frac{d_{max.m} \cdot (2501 + 1,93 \cdot t_m) - 1000 \cdot (t_c - t_m)}{(2501 + 1,93 \cdot t_c)} \quad (2.7)$$

где $d_{max.m}$ – влагоемкость воздуха при температуре *мокрого* термометра, г/кг с.в.

Для расчетов, связанных с влажным воздухом, широко применяется *i-d* диаграмма, один из вариантов которой представлен на рисунке 2.1. Особенностью диаграммы является то, что она построена в системе координат с углом между осями 135° , поэтому линии постоянной энтальпии на диаграмме располагаются под углом 45° .

С помощью *i-d* диаграммы по положению точки, соответствующей определенному состоянию влажного воздуха, можно определить значения всех параметров этого воздуха (энтальпию i , относительную влажность φ , влагосодержание d , влагоемкость d_{max} , парциальное давление пара p_p , температуры соответственно *мокрого* и *сухого* термометров t_m и t_c). Для этого достаточно знать значения двух любых параметров из перечисленных (обычно это параметры t_m и t_c).

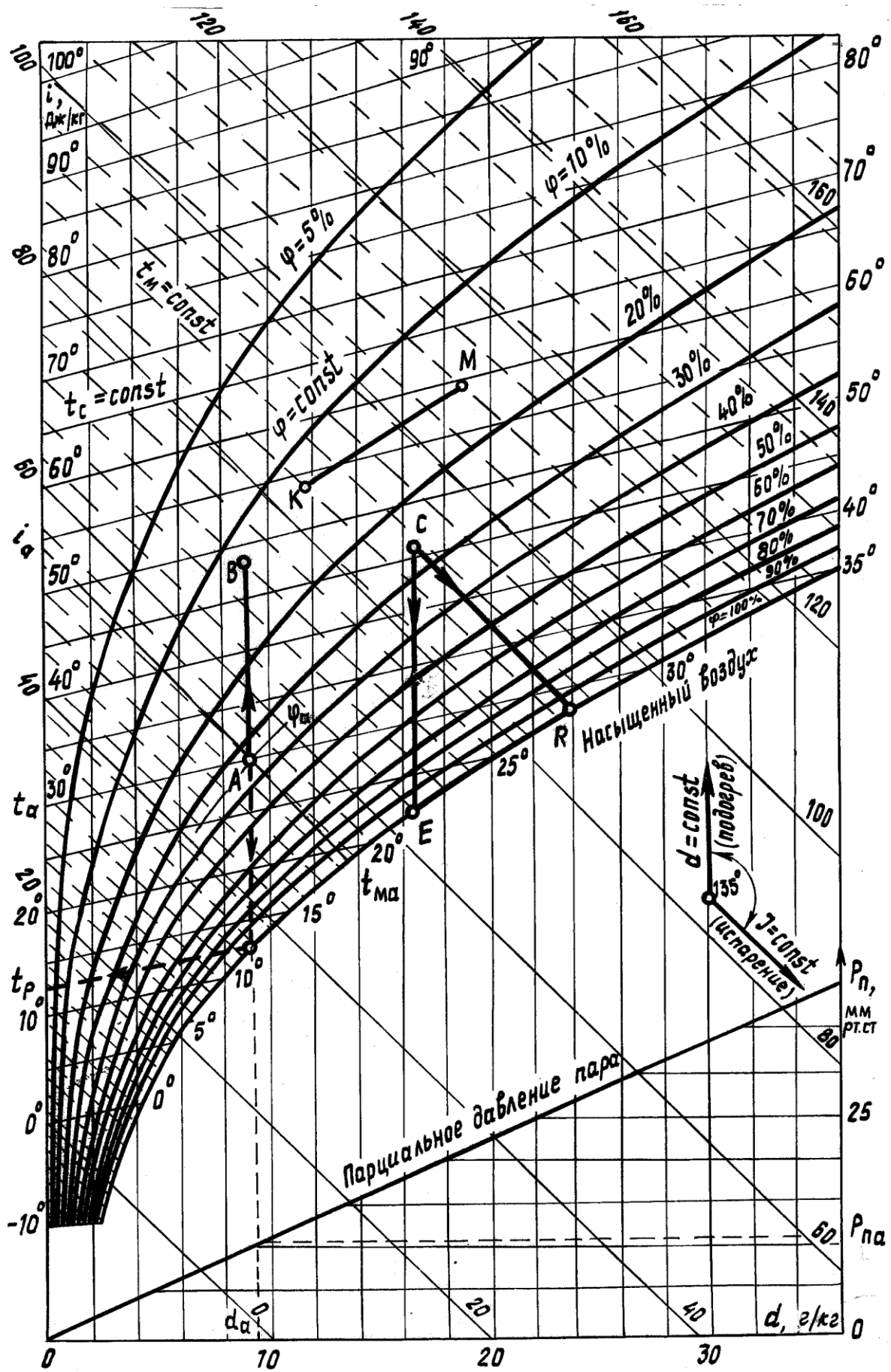


Рисунок 2.1 – Диаграмма $i-d$ влажного воздуха

Подписи значений параметров могут дублироваться, при этом они имеют такой же наклон, как и соответствующие им линии.

Значения для параметра t_c указываются слева (ось ординат). Здесь же приводятся значения энтальпии, расположенные под углом 45° .

Значения для параметра t_m приводятся возле кривой $\varphi = 100\%$. Им соответствуют пунктирные линии, незначительно отличающиеся по своему наклону от линий энтальпии.

Линии относительной влажности имеют дугообразную форму с подписями в правой части диаграммы (в процентах).

Значения влагосодержания и влагоемкости указаны внизу (ось абсцисс). При этом значение влагоемкости определяется по температуре влажного термометра – находится точка пересечения линии, соответствующей значению параметра t_m и линии $\varphi = 100\%$. Значение влагосодержания d , соответствующее этой точке, является влагоемкостью d_{max} .

Значения парциального давления пара приведены в нижней правой части диаграммы, и для определения данного параметра построена вспомогательная наклонная линия. Для определения значения параметра p_p необходимо из соответствующей состоянию влажного воздуха точки опустить перпендикуляр до вспомогательной линии, а затем к нему восстановить второй перпендикуляр (данный процесс изображен на рисунке 2.1 для точки А).

Примеры:

точке В соответствуют температуры $t_m \approx 24^\circ\text{C}$ и $t_c \approx 48^\circ\text{C}$, энтальпия $i_B \approx 70$ Дж/кг с.в., относительная влажность $\varphi_B \approx 13\%$, влагосодержание $d_B \approx 9,3$ г/кг с.в., влагоемкость $d_{max.B} \approx 19$ г/кг с.в., парциальное давление пара $p_{п.В} \approx 11$ мм рт.ст.

точке С соответствуют температуры $t_m \approx 27,8^\circ\text{C}$ и $t_c \approx 46^\circ\text{C}$, энтальпия $i_C \approx 88$ Дж/кг с.в., относительная влажность $\varphi_C \approx 26\%$, влагосодержание $d_C \approx 16,5$ г/кг с.в., влагоемкость $d_{max.C} \approx 24,5$ г/кг с.в., парциальное давление пара $p_{п.С} \approx 18$ мм рт.ст.

Процесс $A-B$ является нагревом воздуха без дополнительного поступления влаги, т.е. влагосодержание $d = 9,3$ г/кг с.в. = $const$. При этом в результате повышения температуры воздуха от 30 до 48°C его влагоемкость увеличивается от $13,5$ до 19 г/кг с.в., что приводит к уменьшению относительной влажности от 35 до 13 %, т.е. воздух высушивается.

Процесс $C-E$ является охлаждением воздуха от 46 до 22°C , при этом точке E соответствует температура точки росы $t_p = 22^\circ\text{C}$. При дальнейшем охлаждении воздух будет оставаться насыщенным, а его влагосодержание будет снижаться (процесс протекает по линии $\varphi = 100$ %). Таким образом можно уменьшить количество исходной влаги в воздухе, что широко применяется, например, в процессах кондиционирования воздуха.

Процесс $C-R$ соответствует увлажнению воздуха без потерь теплоты (адиабатный процесс сушки в идеальной сушилке при $i = const$), поэтому он изображается под углом в 45° , т.е. параллельно линиям энтальпии. Разность влагосодержаний $d_R - d_c = 24 - 16,5 = 7,5$ г/кг с.в. представляет собой количество влаги, которое поглотил каждый килограмм сухого воздуха.

3. Описание лабораторной установки. Методика проведения измерений

Для выполнения работы используется лабораторная установка, схема которой изображена на рисунке 2.2. Она представляет собой трубу с прямоугольным сечением, в которую вентилятором подается комнатный воздух. Его состояние определяется по показаниям первой пары термометров 1-2, которые устанавливаются в специальные отверстия. Далее этот воздух проходит через ТЭН и нагревается; состояние полученного нагретого воздуха определяется по показаниям второй пары термометров 3-4. Проходя через сушильную камеру (короб с увлажненной марлей), воздух забирает часть влаги и охлаждается; состояние полученного увлажненного воздуха фиксируется показаниями третьей пары термометров 5-6.

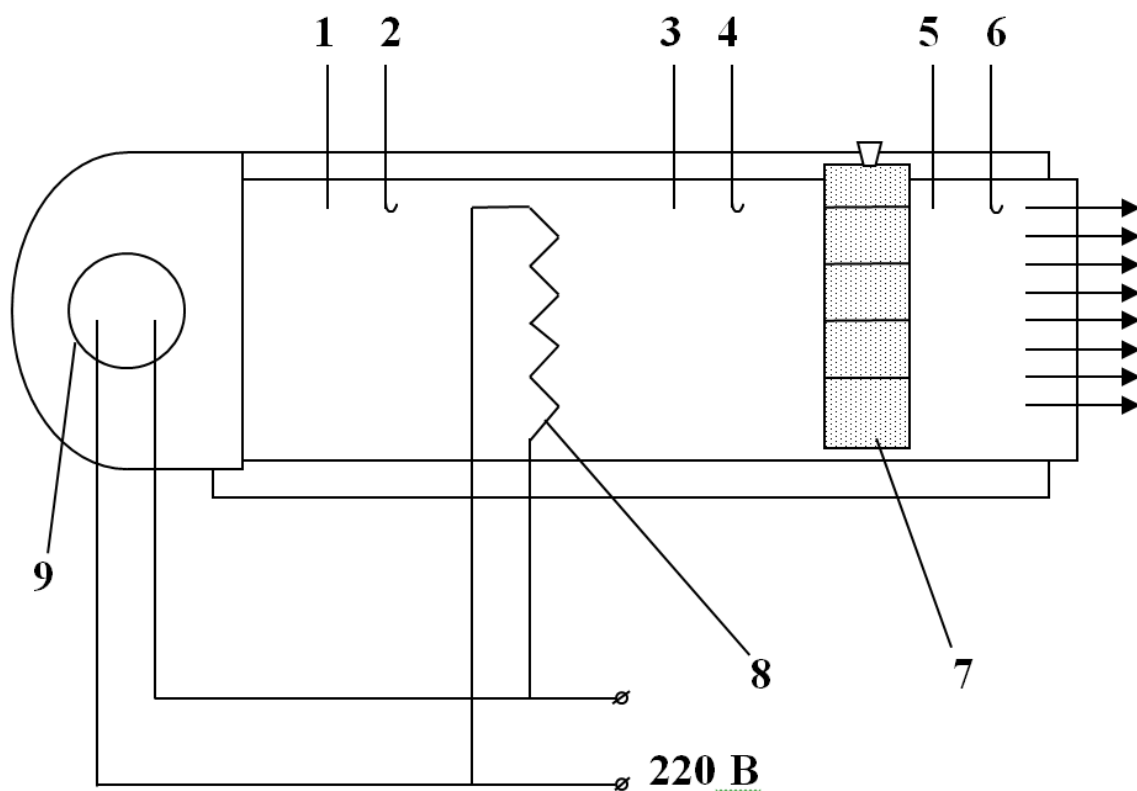


Рисунок 2.2 – Схема лабораторной установки (вид сверху):

1, 3, 5 – сухие термометры; 2, 4, 6 – мокрые термометры; 7 – сушильная камера;
8 – теплоэлектронагреватель (ТЭН); 9 – вентилятор

Для снятия показаний необходимо выполнить следующие действия:

1. Увлажнить материал в сушильной камере и ткань на термометрах 2, 4, 6.
2. Запустить вентилятор.
3. Подать питание на теплоэлектронагреватель.
4. При установившемся режиме, когда показания термометров перестанут меняться, занести их в таблицу 2.2.
5. Выключить установку.

Поскольку проведение лабораторных опытов для нескольких групп студентов требуют значительных временных затрат, для наглядного представления проводится только один опыт, а лабораторная работа выполняется на основании проведенных ранее измерений (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Исходные данные для выполнения лабораторной работы*

Вар. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{c1}, ^\circ\text{C}$	17	24								
$t_{M1}, ^\circ\text{C}$	11	15								
$t_{c2}, ^\circ\text{C}$	44	55								
$t_{M2}, ^\circ\text{C}$	21	25								
$t_{c3}, ^\circ\text{C}$	28	40								
$t_{M3}, ^\circ\text{C}$	18	25								
$B, \text{мм рт.ст}$	746	748								

* По мере выполнения лабораторных опытов табличные данные будут пополняться.

4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями. Письменно ответить на контрольные вопросы (п. 6).
2. Привести схему лабораторной установки. Ознакомиться с ее описанием.
3. Пользуясь исходными данными, расчетными формулами, справочными таблицами и $i-d$ диаграммой, заполнить таблицы 2.2 и 2.3. Привести результаты расчетов.

Таблица 2.2 – Результаты измерений

№	Термометр	Показания, $^\circ\text{C}$
	обозначение	
1	t_{c1}	
2	t_{M1}	
3	t_{c2}	
4	t_{M2}	
5	t_{c3}	
6	t_{M3}	
Атмосферное давление B		_____ мм рт.ст.
		_____ кПа

Таблица 2.3 – Результаты определения параметров влажного воздуха

Параметр	Обозначение, размерность	Значение по расчету (по диаграмме)		
		термометры		
		1-2	3-4	5-6
Давление насыщения водяного пара при температуре <i>сухого</i> термометра	$p_{н.с.}$, кПа	__ ()	__ ()	__ ()
Давление насыщения водяного пара при температуре <i>мокрого</i> термометра	$p_{н.м.}$, кПа	__ ()	__ ()	__ ()
Влагоемкость воздуха при температуре <i>мокрого</i> термометра	$d_{max.м.}$, г/кг с.в.	__ ()	__ ()	__ ()
Влагосодержание воздуха	d , г/кг с.в.	__ ()	__ ()	__ ()
Парциальное давление пара	p_n , кПа	__ ()	__ ()	__ ()
Относительная влажность воздуха	φ , %	__ ()	__ ()	__ ()
Энтальпия влажного воздуха	i , кДж/кг с.в.	__ ()	__ ()	__ ()

4. Схематично изобразить $i-d$ диаграмму (рис. 2.3) и указать значения параметров, полученных с ее помощью.

5. Подготовиться к ответам на дополнительные контрольные вопросы (п. 7).

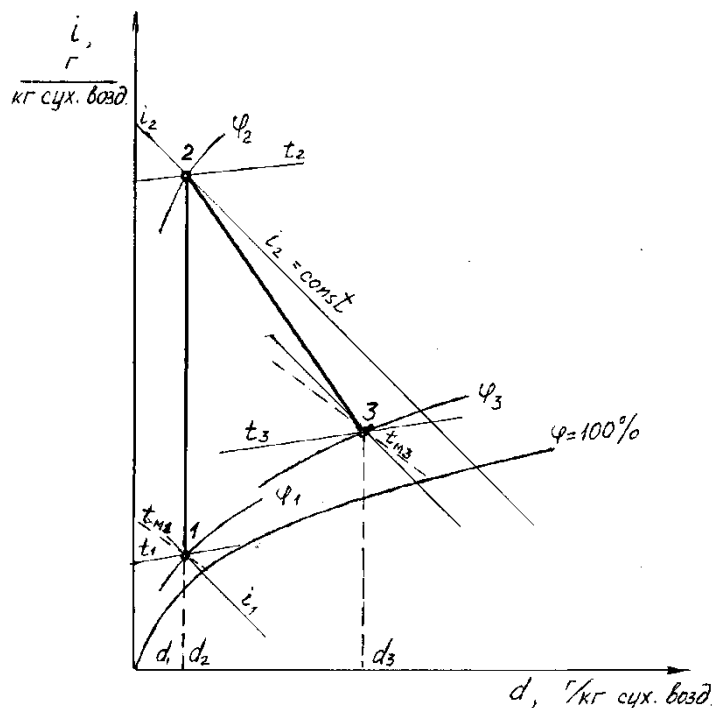


Рисунок 2.3 – Процессы нагрева и увлажнения воздуха на диаграмме $i-d$

5. Пояснения для выполнения работы

1. Значения давления насыщения водяного пара $p_{н.с.}$ и $p_{н.м.}$ берутся из таблицы (приложение 3).

2. Для расчета остальных параметров влажного воздуха, представленных в таблице 2.3, используются следующие формулы:

$$d_{max.м} = 622 \cdot \frac{p_{н.м.}}{B - p_{н.м.}}.$$
$$d = \frac{d_{max.м} \cdot (2501 + 1,93 \cdot t_{м}) - 1000 \cdot (t_{с} - t_{м})}{(2501 + 1,93 \cdot t_{с})}.$$
$$p_{п} = B \cdot \frac{d}{d + 622}.$$
$$\varphi = \frac{p_{п}}{p_{н.с.}} \cdot 100.$$
$$i = t_{с} + \frac{d}{1000} \cdot (2501 + 1,93 \cdot t_{с}).$$

В этих формулах приняты следующие обозначения:

$d_{max.м}$ – влагоемкость воздуха при температуре *мокрого* термометра, г/кг с.в.;

$p_{н.с.}$, $p_{н.м.}$ – давления насыщения водяного пара при температуре соответственно *сухого* и *мокрого* термометров, Па;

B – атмосферное давление, Па;

d – влагосодержание, г/кг с.в.;

$t_{с}$ и $t_{м}$ – температура по показаниям соответственно *сухого* и *мокрого* термометров, °С;

$p_{п}$ – парциальное давление пара, Па;

φ – относительная влажность, %;

i – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг с.в.

3. Эти же параметры определяются с использованием *i-d* диаграммы

4. Сделать заключение по работе, пользуясь приведенным примером: "Из расчётов видно, что в процессе 1-2 при нагревании воздуха от ___ до ___ °С его влагоемкость повышается на ___ г/кг с.в., в результате чего относительная влажность снижается на ___ %. В процессе увлажнения 2-3 при прохождении воздуха через сушильную камеру его влагосодержание увеличивается на ___ г/кг с.в., относительная влажность воздуха – на ___ %. Это означает, что на каждый килограмм сухого воздуха приходится ___ грамм влаги, забираемой из сушильной камеры.

6. Тестовые контрольные вопросы

1. Что собой представляет собой *влажный воздух*?
2. Что называется *абсолютной влажностью* воздуха?
3. Что называется *относительной влажностью* воздуха?
4. Что называется *влагосодержанием* воздуха?
5. Что называется *влагоемкостью* воздуха?
6. Что представляет собой *парциальное давление пара* в воздухе?
7. Что называется *ненасыщенным* воздухом?
8. Что называется *насыщенным* воздухом?
9. Что собой представляет прибор *психрометр*?
10. Почему отличаются показания *сухого* и *мокрого* термометров?
11. Могут ли совпадать показания *сухого* и *мокрого* термометров? Если могут, то в каком случае?
12. Что называется *точкой росы*?
13. Как изменяется *влагоемкость* воздуха с повышением (понижением) его температуры?
14. С какой целью воздух перед сушильной камерой подогревается?
15. Как изменяется *относительная влажность* воздуха при его нагреве (охлаждении)?
16. Каким образом можно понизить *влагосодержание* воздуха?
17. Перечислите параметры воздуха, представленные на *i-d* диаграмме (название, обозначение, размерность).

7. Дополнительные контрольные вопросы

18. Опишите устройство и принцип работы лабораторной установки, порядок проведения лабораторных измерений.
19. Используя $i-d$ диаграмму, по заданным значениям температуры сухого и мокрого термометров определить все параметры влажного воздуха (по указанию преподавателя).
20. Определить максимальное количество влаги, которое может забрать в сушильной камере идеальной сушилки ненасыщенный воздух с заданными параметрами (по указанию преподавателя).
21. Определить точку росы для воздуха с заданными значениями температуры и влажности (по указанию преподавателя).
22. Пользуясь $i-d$ диаграммой, найти относительную влажность воздуха с заданными начальными параметрами (t_1, φ_1) при нагреве его до температуры t_2 (по указанию преподавателя).
23. Как на $i-d$ диаграмме изображается процесс нагрева воздуха при отсутствии увлажнения?
24. Как на $i-d$ диаграмме изображается процесс прохождения воздуха через рабочую камеру идеальной сушилки (при отсутствии потерь теплоты)?
25. Каким образом с помощью $i-d$ диаграммы можно найти влагоемкость воздуха?

Список литературы

1. Амерханов Р.А., Драганов Б.Х. Теплотехника: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М., 2006. 432 с.: ил.
2. Кузнецов Ю.В., Никифоров А.Г. Теплотехника: учеб. для вузов. Смоленск: Смоленская ГСХА, 2021. 278 с.: ил.
3. Михайличенко С.М., Купреенко А.И., Исаев Х.М. Теплотехника. Курс лекций. Ч. I. Техническая термодинамика: учебно-методическое пособие по дисциплине «Теплотехника» для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 35.03.06 Агроинженерия. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2022. 58 с.
4. Михайличенко С.М., Купреенко А.И., Исаев Х.М. Теплотехника. Примеры решения задач: метод. пособие по выполнению практических и самостоятельных работ по дисциплине «Теплотехника и теплоснабжение предприятий пищевых производств». Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2022. 132 с.
5. Никифоров А.Г., Попова Д.Ю. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания: учеб.-метод. пособие. Смоленск: Изд-во Смоленская ГСХА, 2017. 75 с.
6. Рудобашта С.П. Теплотехника. М.: КолосС, 2010. 599 с.: ил. (Учеб. и учеб. пособия для студ. высш. учеб. заведений).
7. Чащинов В.И. Практикум по теплотехнике: учеб. пособие для студ. агроинженерных специальностей. Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2009. 86 с.
8. Чащинов В.И. Теплотехника: учеб. пособие для студентов, обучающихся по направлениям подготовки для предприятий переработки сельскохозяйственной продукции, пищевых производств и предприятий общественного питания. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2015. 220 с.

**Приложение 1 – Термодинамические свойства воды и водяного пара
в состоянии насыщения**

p , бар	t_n , $^{\circ}\text{C}$	$v'_{1,}$ $\text{м}^3/\text{кг}$	v'' , $\text{м}^3/\text{кг}$	i , кДж/кг	i' , кДж/кг	r , кДж/кг
2,0	120,2	0,00106	0,8854	504,8	2707	2202,2
2,1	121,8	0,00106	0,8459	511,4	2709	2197,6
2,2	123,3	0,00106	0,8098	517,8	2711	2193,2
2,3	124,7	0,00106	0,7772	523,7	2713	2189,3
2,4	126,1	0,00106	0,7468	529,6	2715	2185,4
2,5	127,4	0,00107	0,7188	535,4	2717	2181,6
2,6	128,7	0,00107	0,6923	540,9	2719	2178,1
2,7	130,0	0,00107	0,6688	546,2	2721	2174,8
2,8	131,2	0,00107	0,6464	551,4	2722	2170,6
2,9	132,4	0,00107	0,6254	556,5	2724	2167,5
3,0	133,5	0,00107	0,6059	561,4	2726	2164,6
3,1	134,7	0,00107	0,5875	566,2	2727	2160,8
3,2	135,8	0,00108	0,5703	570,9	2728	2157,1
3,3	136,8	0,00108	0,5540	575,5	2730	2154,5
3,4	137,9	0,00108	0,5387	579,9	2731	2151,1
3,5	138,9	0,00108	0,5245	584,3	2732	2147,7
3,6	139,9	0,00108	0,5106	588,5	2734	2145,5
3,7	140,8	0,00108	0,4976	592,7	2735	2142,3
3,8	141,8	0,00108	0,4853	596,8	2736	2139,2
3,9	142,7	0,00108	0,4736	600,8	2737	2136,2
4,0	143,6	0,00108	0,4624	604,7	2738	2133,3
4,1	144,5	0,00108	0,4518	608,5	2740	2131,5
4,2	145,4	0,00109	0,4417	612,3	2741	2128,7
4,3	146,3	0,00109	0,4320	616,0	2742	2126
4,4	147,1	0,00109	0,4228	619,6	2743	2123,4
4,5	147,9	0,00109	0,4139	623,2	2744	2120,8

Приложение 2 – Термодинамические свойства воды и перегретого пара

t, °C	p = 1,0 бар			p = 1,1 бар			p = 1,2 бар		
	v'', м³/кг	i'', кДж/кг	s'', кДж/кгК	v'', м³/кг	i'', кДж/кг	s'', кДж/кгК	v'', м³/кг	i'', кДж/кг	s'', кДж/кгК
104	1,71	2685	7,39	1,56	2684	7,34	0,001	439	1,38
105	1,715	2687	7,395	1,564	2686	7,345	1,43	2684	7,30
106	1,72	2689	7,4	1,568	2688	7,35	1,434	2686	7,305
107	1,725	2691	7,405	1,512	2690	7,355	1,438	2688	7,31
108	1,73	2693	7,41	1,576	2692	7,36	1,442	2690	7,32
109	1,735	2695	7,415	1,58	2694	7,365	1,446	2692	7,325
110	1,74	2697	7,42	1,584	2696	7,37	1,45	2694	7,33
111	1,745	2699	7,425	1,589	2698	7,375	1,454	2696	7,335
112	1,75	2701	7,43	1,594	2700	7,38	1,458	2698	7,34
113	1,755	2703	7,435	1,60	2702	7,385	1,462	2700	7,345
114	1,76	2705	7,44	1,604	2704	7,39	1,466	2702	7,35
115	1,765	2707	7,445	1,608	2706	7,395	1,47	2704	7,355
116	1,77	2709	7,45	1,613	2708	7,40	1,474	2706	7,36
117	1,775	2711	7,455	1,618	2710	7,405	1,478	2708	7,315
118	1,78	2713	7,46	1,622	2712	7,41	1,482	2710	7,37
119	1,785	2715	7,465	1,626	2714	7,415	1,486	2712	7,375
120	1,79	2717	7,47	1,63	2716	7,42	1,49	2715	7,38
	p = 1,3 бар			p = 1,4 бар			p = 1,5 бар		
t, °C	v'', м³/кг	i'', кДж/кг	s'', кДж/кгК	v'', м³/кг	i'', кДж/кг	s'', кДж/кгК	v'', м³/кг	i'', кДж/кг	s'', кДж/кгК
104	0,001	440	1,37	0,001	440	1,36	0,001	440	1,36
105	0,001	445	1,38	0,001	445	1,38	0,001	445	1,38
106	0,001	449	1,39	0,001	450	1,39	0,001	450	1,39
107	1,33	2687	7,27	0,001	454	1,4	0,001	454	1,4
108	1,333	2689	7,276	0,001	458	1,41	0,001	458	1,41
109	1,337	2691	7,283	1,24	2690	7,25	0,001	463	1,42
110	1,34	2693	7,29	1,24	2692	7,255	0,001	467	1,43
111	1,343	2695	7,295	1,243	2694	7,26	1,16	2694	7,22
112	1,346	2697	7,30	1,246	2696	7,265	1,164	2695	7,225
113	1,35	2699	7,305	1,249	2698	7,27	1,168	2697	7,23
114	1,353	2701	7,31	1,252	2700	7,275	1,172	2699	7,235
115	1,356	2703	7,315	1,255	2702	7,28	1,176	2701	7,24
116	1,359	2705	7,32	1,258	2704	7,285	1,180	2703	7,245
117	1,362	2707	7,325	1,261	2706	7,29	1,183	2705	7,250
118	1,365	2709	7,33	1,264	2708	7,293	1,186	2707	7,257
119	1,367	2711	7,335	1,267	2710	7,296	1,188	2709	7,263
120	1,37	2713	7,34	1,27	2713	7,3	1,19	2712	7,27

Приложение 3 – Давление насыщения водяного пара (по температуре)

$t, ^\circ\text{C}$	7	8	9	10	11	12	13	14
$p_n, \text{Па}$	1000	1072	1148	1228	1312	1402	1498	1598
$t, ^\circ\text{C}$	15	16	17	18	19	20	21	22
$p_n, \text{Па}$	1704	1818	1938	2065	2185	2338	2486	2645
$t, ^\circ\text{C}$	23	24	25	26	27	28	29	30
$p_n, \text{Па}$	2810	2985	3165	3360	3565	3780	4000	4240
$t, ^\circ\text{C}$	31	32	33	34	35	36	37	38
$p_n, \text{Па}$	4500	4770	5050	5330	5620	5950	6290	6635
$t, ^\circ\text{C}$	39	40	41	42	43	44	45	46
$p_n, \text{Па}$	6995	7370	7750	8200	8640	9100	9580	10100
$t, ^\circ\text{C}$	47	48	49	50	51	52	53	54
$p_n, \text{Па}$	10620	11150	11750	12340	12990	13610	14400	15010
$t, ^\circ\text{C}$	55	56	57	58	59	60		
$p_n, \text{Па}$	15740	16380	17300	18200	19050	19920		

Учебное издание

Чащинов Валерий Иванович, Михайличенко Станислав Михайлович,
Купреенко Алексей Иванович, Исаев Хафиз Мубариз-оглы

Т Е П Л О Ф И З И К А

Методические указания
для выполнения лабораторных работ

Часть I

Редактор Осипова Е.Н.

Подписано к печати 03.10.2022 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Усл. п. л. 2,09. Тираж 25 экз. Изд. № 7375.

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ