

Q 6166

**Федеральное агентство по образованию**

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**



Кафедра теоретических основ  
тепло- и хладотехники

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ СУХОСТИ  
ВЛАЖНОГО ПАРА  
(виртуальный вариант)**

Методические указания  
к лабораторной работе № 4  
по курсу «Термодинамика»

для студентов специальностей

140401, 140504, 190603, 220301, 240902, 260601,  
260202, 260204, 260301, 260302, 260303, 260504

очной и заочной формы обучения



Санкт-Петербург

2009

**Клецкий А.В., Федоров В.Н. Митропов В.В., Морозов Е.А.**  
Определение степени сухости влажного пара (виртуальный вариант):  
Метод. указания к лабораторной работе № 4 по курсу «Термодинамика» для студентов спец. 140401, 140504, 190603, 220301, 240902, 260601, 260602, 260202, 260204, 260301, 260302, 260303, 260504 очной и заочной формы обучения. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2009. – 17 с.

Приводится описание лабораторной работы, выполняемой на ЭВМ. Указана последовательность действий студента в процессе проведения работы, а также содержание подготавливаемого им отчета.

Рецензент

Доктор техн. наук, проф. В.И. Пекарев

Рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

© Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, 2009

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания содержат описание лабораторной работы по курсу термодинамики. Лабораторная работа выполняется студентами с помощью ПК, при этом вместо традиционного экспериментального лабораторного стенда используется его изображение на экране дисплея. Выполнение работы состоит из ряда последовательных процедур. Сначала с помощью ПК проверяются знания студента (по соответствующему разделу термодинамики [1] (реальные газы, пары, состояния вещества: ненасыщенная и насыщенная жидкость, влажный, сухой насыщенный и перегретый пар, критическое состояние, температура и давление насыщения, удельная теплота парообразования, степень сухости влажного пара) и устройству экспериментального стенда. При успешном выполнении этого теста студент приступает к сборке установки и оснащению ее измерительными приборами, затем включает ее в работу, проводит измерения, заносит их результаты в протокол, выключает установку, обрабатывает опытные данные, оформляет отчет по выполненной работе и сдает его на проверку преподавателю.

### 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ

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

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

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

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

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

Состояние влажного пара определяется двумя параметрами: давлением (или температурой) и степенью сухости. Так как при одном давлении и соответствующей температуре насыщения возможно бесчисленное множество состояний влажного пара, отличающихся по степени сухости, то таблицы влажного пара не составляются и параметры его определяются расчетом.

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

$$h_x = h' + rx,$$

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

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.

## 2. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Устройство показано на рисунке. Образовавшийся в электрическом парогенераторе 1 водяной пар поступает в пароперегреватель 2. Несмотря на наличие в парогенераторе приспособления для осушки, входящий в пароперегреватель пар имеет степень сухости  $x$  меньше единицы, т. е. является влажным. Пароперегреватель представляет собой трубку, внутри которой движется пар, а снаружи расположен электрический нагреватель. Для уменьшения теплопотерь 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 4.

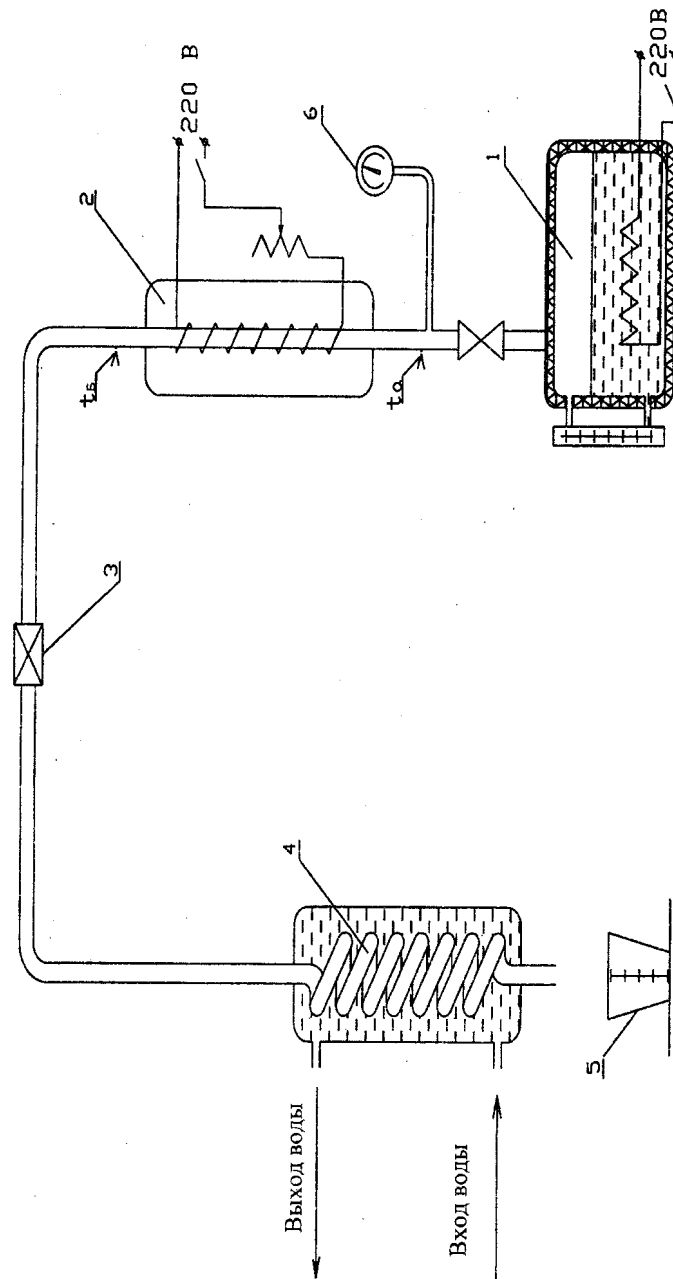


Схема экспериментальной установки:

1 – парогенератор; 2 – пароперегреватель; 3 – вентиль; 4 – конденсатор; 5 – мерный сосуд; 6 – манометр

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 5.

В цепь электронагревателя, установленного на пароперегревателе, включены ваттметр для измерения и реостат для регулировки мощности. Состояние пара, входящего в пароперегреватель, обозначим буквой «а», а выходящего – буквой «б». 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 6.

### 3. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа выполняется в виртуальном варианте, т. е. все процессы происходящие на реальном экспериментальном стенде имитируются с помощью ПК. Проведение работы начинается с «разминки», в ходе которой студент должен ответить на несколько вопросов по возможным состояниям реального газа и его термодинамическим свойствам, а также по устройству стенда, подтвердив тем самым готовность приступить непосредственно к выполнению лабораторной работы. На экране дисплея по очереди будут возникать вопросы и шесть вариантов ответа. Необходимо отметить ВСЕ правильные из них. При неудачных ответах предоставлена вторая возможность пройти этот тест.

После успешного выполнения теста студент допускается к сборке установки, в ходе которой он с помощью мышки и курсора перемещает из склада с оборудованием на свободное поле дисплея нужные элементы и собирает из них виртуальный лабораторный стенд, соединив их трубами в правильной последовательности. Прямые и согнутые трубы можно не только передвигать, но и поворачивать до нужного положения. Затем студент аналогичным способом оснащает установку измерительными приборами.

После проверки правильности сборки экспериментального стенда и установки на нем измерительных приборов студент приступает к запуску его в работу.

Прежде всего необходимо убедиться в наличии воды в парогенераторе и при необходимости добавить воду. Затем открыть поток воды через теплообменник и включить парогенератор в электросеть. Отметить отклонения стрелки на вольтметре и амперметре, повышение температуры воды, рост давления, кипение воды, прохождение пара по контуру установки, рост температуры воды, протекающей через конденсатор. Далее необходимо включить в электросеть пароперегреватель. Установить рабочее давление и температуру и выйти на стационарный режим. На этом завершаются процедуры запуска установки.

Затем следует освободить мензурку при наличии в ней воды. Записать значения измеряемых величин в начальный момент времени ( $\tau = 0$ ): ЭДС термопар, показание манометра, величину атмосферного давления. Пока набирается вода в мерный сосуд, показания приборов записать три раза, зафиксировать время, за которое набралась вода в мерный сосуд, и объем набранной воды.

Для определения показаний прибора с помощью мышки выйти на прибор и в сноске рядом с ним возникают цифры показаний прибора (или шкала и стрелка).

Заполнить протокол наблюдений. Бланк протокола получить у лаборанта.

Отключение установки выполнить в следующем порядке:

- обесточить парогенератор и пароперегреватель,
- перекрыть поток воды через теплообменник,

#### Протокол наблюдений

Атмосферное давление  $B =$  мм рт.ст.

№ измерения	Показание манометра, кгс/см <sup>2</sup>	$Q_w$ , Вт	ЭДС термопар, мВ		$m$ , кг	$\tau$ , мин
			$E_a$	$E_b$		
1						
2						
3						
Среднее за опыт						

При проведении опыта измеряются следующие величины: давление пара  $p_{изб}$  – манометром, атмосферное давление  $B$  – барометром, температура  $t_b$  – термопарой, мощность грелки  $Q_w$  – ваттметром и продолжительность опыта  $\tau$  – секундомером. Температура  $t_a$  измеряется термопарой, а также может быть найдена по таблицам насыщенных паров (см. прил., табл. 1 и 2) на основании показаний манометра.

При установившемся режиме массовый расход пара, проходящего в секунду через пароперегреватель, равен секунднему расходу образовавшегося конденсата. Массовый расход конденсата  $M$  может быть определен с помощью мерного сосуда 5. Для этого измеряют количество жидкости, полученной за какой-то отрезок времени, например 15–20 мин, и рассчитывают расход  $M$  (кг/с).

#### 4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА

Обработка опытных данных производится в следующем порядке.

Определяется абсолютное давление  $p_{абс} = p_{изб} + B$ . По графику или таблице градуировки определяют 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  $p_{абс}$ .

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

$$h_b = h_a + q,$$

где  $h_b$  – энтальпия пара в точке «б», кДж/кг;  $h_a$  – энтальпия пара в точке «а», 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 «б» 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

$$q = Q/M,$$

где  $Q$  – тепловой поток, подводимый к пару, кВт;  $M$  – массовый расход кг/с.

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  $t_w$  из таблицы вида  $Q_m/Q_w = f(t_w)$ , 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  $r_a$  находятся по таблицам насыщенных паров или по диаграммам  $T-s$  и  $h-s$  при температуре входящего пара  $t_a$ .

Таким образом, в формуле  $h_x = h' + rx$  известны все величины, кроме  $x_a$ , следовательно

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

Итоги расчетов оформляются в виде таблицы.

#### Результаты обработки опытных данных

№ опыта	$p$ , МПа	$t_b$ , °С	$Q_w$ , Вт	$Q_m$ , Вт	$Q$ , Вт	$M$ , кг/с	$q$ , кДж/кг	$h_b$ , кДж/кг	$t_a$ , °С	$h_a$ , кДж/кг	$r_a$ , кДж/кг	$x_a$
1												

#### 5. ОТЧЕТ О РАБОТЕ

По окончании работы составляется отчет, в котором приводятся:

- схема установки;
- характеристика применяемых в работе измерительных приборов;

- протокол наблюдений;
- таблица и график градуировки термомпар;
- результаты обработки опытных данных и таблица расчетных данных;
- изображение всех процессов, происходящих на установке в диаграммах  $T-s$  и  $h-s$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Термодинамические свойства воды и водяного пара на линии насыщения

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

Термодинамические свойства перегретого водяного пара

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

Продолжение табл. 2

$t_s$ °C	$v_s$ м <sup>3</sup> /кг	$h_s$ кДж/кг	$s_s$ кДж/(кг·К)	$p = 0,15$ МПа			$p = 0,2$ МПа			$p = 0,25$ МПа		
				$v_s$ м <sup>3</sup> /кг	$h_s$ кДж/кг	$s_s$ кДж/(кг·К)	$v_s$ м <sup>3</sup> /кг	$h_s$ кДж/кг	$s_s$ кДж/(кг·К)	$v_s$ м <sup>3</sup> /кг	$h_s$ кДж/кг	$s_s$ кДж/(кг·К)
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	—	—	

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы хладотехники. Часть 1. Термодинамика / Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: 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.



## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ.....	3
2. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА.....	4
3. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ.....	6
4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА.....	8
5. ОТЧЕТ О РАБОТЕ.....	9
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	11
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	15

Клецкий Александр Владимирович,  
Федоров Валерий Николаевич,  
Митропов Владимир Викторович,  
Морозов Евгений Андреевич

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ СУХОСТИ ВЛАЖНОГО ПАРА (виртуальный вариант)

Методические указания  
к лабораторной работе № 4  
по курсу «Термодинамика»  
для студентов специальностей  
140401, 140504, 190603, 220301, 240902, 260601,  
260202, 260204, 260301, 260302, 260303, 260504  
очной и заочной формы обучения

*Редактор*  
Л.Г. Лебедева

*Корректор*  
Н.И. Михайлова

*Компьютерная верстка*  
Н.В. Гуральник

---

Подписано в печать 16.12.2009. Формат 60×84 1/16  
Усл. печ. л. 0,93. Печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,88  
Тираж 300 экз. Заказ № 420. С 85

---

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