

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 ЭНТАЛЬПИИ ВОДЯНОГО ПАРА ПРИ ПОМОЩИ АДИАБАТИЧЕСКОГО ДРОССЕЛИРОВАНИЯ (виртуальный вариант)

Методические указания
к лабораторной работе № 3
по курсу «Термодинамика»
для студентов специальностей
070200, 101700, 170600, 230100, 270800,
270900, 271300, 271500, 320700

Санкт-Петербург
2008

УДК 621.1016+621.56

Определение энтальпии водяного пара при помощи адиабатического дросселирования (виртуальный вариант) / А.В. Клецкий, В.Н. Федоров, В.В. Митропов, Е.А. Морозов: Метод. указания к лабораторной работе № 3 по курсу «Термодинамика» для студентов спец. 070200, 101700, 170600, 230100, 270800, 270900, 271300, 271500, 320700. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2008. – 17 с.

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

Рецензент

Доктор техн. наук, проф. Л.С. Тимофеевский

Рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

© Санкт-Петербургский государственный
университет низкотемпературных
и пищевых технологий, 2008

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 ПК проверяет знания студента по соответствующему разделу термодинамики (особенности процесса дросселирования и соотношения между энтальпией и другими термодинамическими параметрами) и устройству экспериментального стенда [1]. 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 о выполненной работе и сдает его на проверку преподавателю.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ

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

$$h = u + pv,$$

где h – энтальпия; u – внутренняя энергия; p – давление; v – удельный объем.

Энтальпию можно представить также как количество теплоты, необходимое для нагревания единицы массы вещества при постоянном давлении, от состояния, принятого за начальное, до данного состояния

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

где Δh – изменение энтальпии; c_{pm} – удельная теплоемкость; t – температура.

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

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

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

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

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

2. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

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

В первой камере с помощью образцового манометра измеряется давление p_1 и с помощью медь-константановой термопары 4 – температура t_1 . Энтальпия пара в первой измерительной камере подлжит определению. Из первой камеры пар поступает в вентиль 5, где и происходит его дросселирование до давления, близкого к атмосферному. После вентиля пар проходит во вторую измерительную камеру 6, где измеряются его параметры после дросселирования: дав-

ление p_2 – образцовым манометром и температура t_2 – термопарой
7.

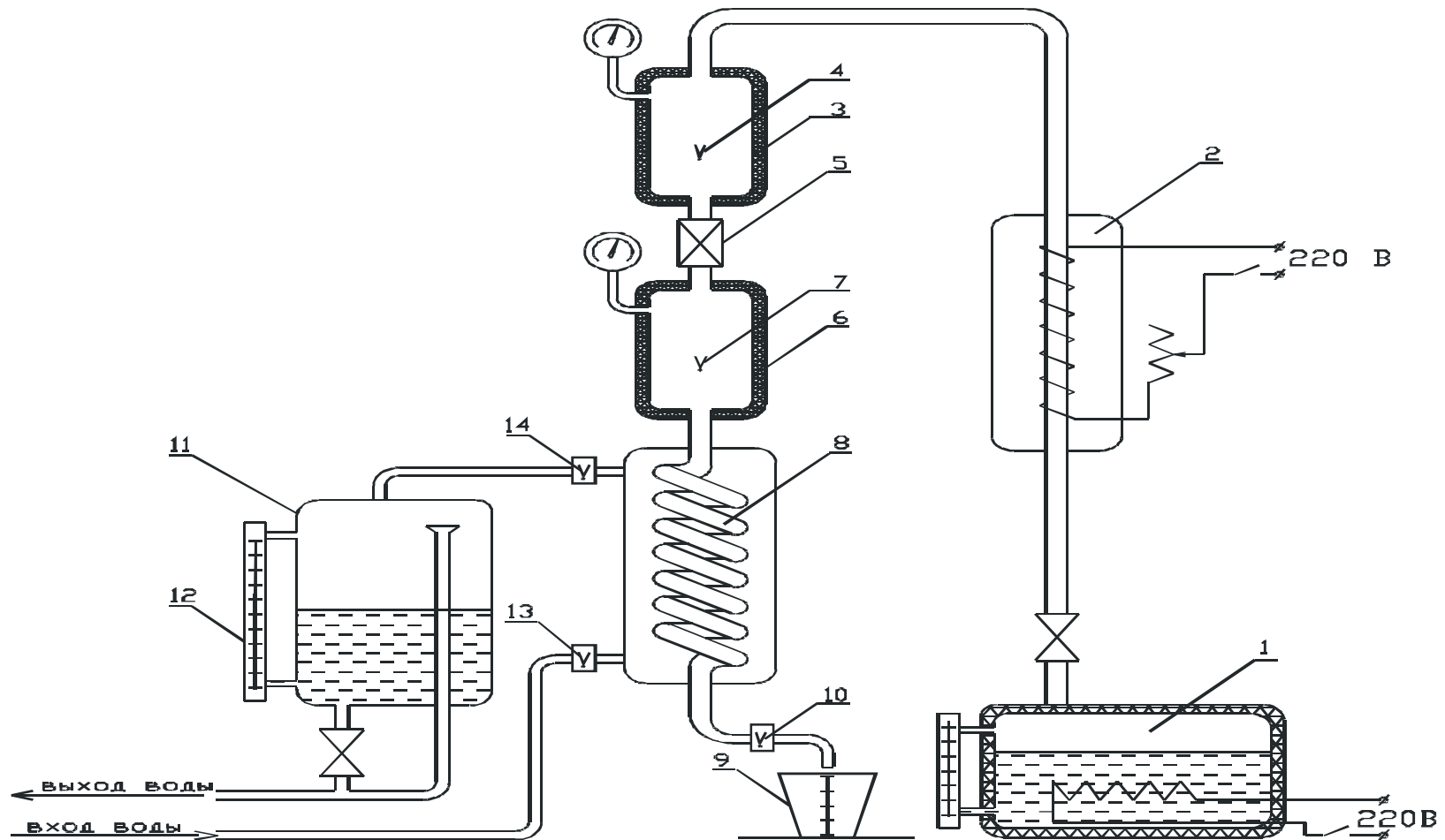


Схема экспериментальной установки:

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

Измерение ЭДС в цепи термопар 4 и 7 производится с помощью цифрового милливольтметра, который переключателем может быть включен в цепь той или другой термопары.

Из второй измерительной камеры пар поступает в конденсатор-калориметр 8, где охлаждается и конденсируется. Образовавшийся конденсат сливается в мерный сосуд 9. Температура конденсата на выходе t_k измеряется с помощью термометра 10. Теплота, отдаваемая паром при охлаждении и конденсации, воспринимается проточной водопроводной водой. Ее расход может быть определен с помощью мерного бака 11, снабженного водомерным стеклом 12. Шкала водомерного стекла отградуирована в литрах.

Температура воды на входе и выходе из конденсатора-калориметра измеряется с помощью термометров 13 и 14. Для уменьшения тепловых потерь все элементы установки, по которым проходит пар, расположены возможно ближе друг к другу и защищены изоляцией. Достаточно большая скорость пара в дроссельном устройстве также способствует адиабатичности процесса.

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 об энтальпии реального газа и ее связи с другими термодинамическими величинами, а также об устройстве 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.

Необходимо убедиться в наличии воды в парогенераторе и при ее необходимости – добавить.

Открыть поток воды через теплообменник.

Включить парогенератор в электросеть. Отметить отклонения стрелок на вольтмере и амперметре, повышение температуры воды, рост давления, кипение воды, прохождение пара по контуру установки, рост температуры воды, протекающей через теплообменник.

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. Переключить вентиль на мерном баке (или перебросить шланг). Записать значения измеряемых величин в начальный момент времени $t = 0$: значения ЭДС термопар, показания манометров, величину атмосферного давления, нулевые (начальные) объемы воды в мензурке и измерительном баке.

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

После заполнения бака водой переключить вентиль и зафиксировать время, убрать мензурку от капающего конденсата. Записать конечные значения измеряемых параметров. Опыт повторить 3–5 раз. Заполнить протокол наблюдений. Бланк протокола получить у лаборанта.

Отключение установки выполнить в следующем порядке:

- обесточить парогенератор и пароперегреватель;
- перекрыть поток воды через теплообменник;
- слить воду из мерного бака.

Протокол наблюдений

Атмосферное давление $B = \underline{\hspace{2cm}}$ мм рт. ст.

Время проведения опыта	Объем охлаждающей воды в баке, л	Объем собранного конденсата, л	№ измерения	Показания манометра, дел. (или кгс/см ²)		ЭДС термопар, мВ				
						В камере		Охлаждающая вода		Конденсат
				p_1	p_2	E_1	E_2	$E_{вх}$	$E_{вых}$	
Начало опыта			1							
			2							
			3							
Конец опыта			4							
			5							
			Среднее за опыт							

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА

Определяются объем конденсата и охлаждающей воды как разности конечного и начального отсчетов по шкале мерного сосуда и по водомерному стеклу. Рассчитывают объемные и массовые расходы конденсата и охлаждающей воды. Подсчитывается абсолютное давление по показаниям манометра и барометра. Значения ЭДС E_1 и E_2 , отсчитанные по шкале цифрового милливольтметра (в милливольтмах), переводятся в градусы Цельсия с помощью имеющихся в лаборатории таблиц градуировки.

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

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

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

$$q = h_2 - h_k,$$

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

Величина q может быть найдена по данным нагревания охлаждающей воды, ее массовом расходе, а также массовом расходе конденсата:

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

где q – удельное количество теплоты, отведенной от пара, кДж/кг; $M_{\text{в}}$ – масса охлаждающей воды, кг; c_{pm} – удельная теплоемкость воды, равная 4,19 кДж/(кг·К); $t_{\text{вых}}$ – температура воды на выходе из конденсатора-калориметра, °С; $t_{\text{вх}}$ – температура воды на входе в конденсатор-калориметр, °С; $M_{\text{к}}$ – масса конденсата, кг.

Энтальпия h_k конденсата может быть рассчитана по формуле

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

где t_k – температура конденсата, °С.

Таким образом,

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

Значения энтальпий h_1 и h_2 необходимо также определить по значениям t_1 и $p_{1\text{абс}}$ в первой камере и t_2 и $p_{2\text{абс}}$ во второй камере с помощью таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара [2], которые в сокращенном виде приводятся в Приложении.

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

Необходимо иметь в виду, что определение энтальпии перегретого пара можно было бы осуществить и не подвергая пар дроссе-

лированию. В этом случае пар из первой измерительной камеры поступал бы непосредственно в конденсатор. При этом расход пара был бы очень велик, следовательно, и теплообменную поверхность конденсатора нужно было бы значительно увеличить.

Для сопоставления опытного значения интегрального эффекта Джоуля–Томпсона $\Delta t = t_2 - t_1$ со значением эффекта, найденного по диаграмме $h-s$ для воды и водяного пара, необходимо выполнить следующее построение. По параметрам пара в первой камере (p_1 и t_1) находят по диаграмме точку 1, через которую проводят линию $h = \text{const}$ до пересечения с изобарой p_2 в точке 2. Затем определяют t_2 и величину эффекта $\Delta t = t_2 - t_1$. Поскольку точность такого построения небольшая, интегральный дроссель-эффект следует рассчитывать, используя интерполяцию табличных данных по термодинамическим свойствам перегретого водяного пара [2].

5. ОТЧЕТ О РАБОТЕ

Отчет о работе должен содержать:

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

ПРИЛОЖЕНИЕ

Термодинамические свойства перегретого водяного пара

$t, ^\circ\text{C}$	$v,$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$h,$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$s,$ $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$v,$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$h,$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$s,$ $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$v,$ $\text{м}^3/\text{кг}$	$h,$ $\text{кДж}/\text{кг}$	$s,$ $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
	$p = 0,1 \text{ МПа}$			$p = 0,12 \text{ МПа}$			$p = 0,14 \text{ МПа}$		
100	1,696	2676,5	7,3628	–	–	–	–	–	–
110	1,745	2696,7	7,4164	1,450	2694,5	7,328	1,239	2692,2	7,252
120	1,793	2716,8	7,4681	1,491	2714,8	7,380	1,275	2712,8	7,305
130	1,841	2736,8	7,518	1,531	2735,0	7,431	1,309	2733,2	7,356
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

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

Окончание.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. **Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А.** Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 408 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ.....	5
2. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА.....	6
3. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ.....	9
4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА.....	11
5. ОТЧЕТ О РАБОТЕ.....	13
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	11
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	14

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

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНТАЛЬПИИ
ВОДЯНОГО ПАРА
ПРИ ПОМОЩИ АДИАБАТИЧЕСКОГО
ДРОССЕЛИРОВАНИЯ
(виртуальный вариант)**

Методические указания
к лабораторной работе № 3
по курсу «Термодинамика»
для студентов специальностей
070200, 101700, 170600, 230100, 270800,
270900, 271300, 271500, 320700

Редактор
Р.А. Сафарова

Корректор
Н.И. Михайлова

Компьютерная верстка
Н.В. Гуральник

Подписано в печать 12.09.2008. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 0,93. Печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,81
Тираж 300 экз. Заказ № С 105

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

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

Определение энтальпии водяного пара при помощи адиабатического дросселирования (виртуальный вариант)

Методические указания
к лабораторной работе № 3
по курсу «Термодинамика»
для студентов специальностей
070200, 101700, 170600, 230100, 270800,
270900, 271300, 271500, 320700

Редактор

Подписано в печать _____.2007. Формат 60×84 1/16.
Печать офсетная. Усл. печ. л. _____. Печ. л. ____. Уч.-изд. л. ____
Тираж ____ экз. Заказ № _____ С 44

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