

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Кафедра энергоустановок морских судов и сооружений

В.А. Тимофеев, О.В. Владецкий

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Методические указания

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
(Часть 1 – техническая термодинамика)
на тему «Расчет теоретических циклов ДВС и ГТУ»



Севастополь
СевГУ
2019

УДК 536.7
ББК 39.46
Т41

Р е ц е н з е н т:

С.Е.Тверская - канд. техн. наук, доцент кафедры ЭМСС

Ответственный за выпуск:

К.Ю. Федоровский - доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой ЭМСС

Тимофеев В.А.

Т41 Техническая термодинамика и теплопередача: метод. указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине (Часть 1 – техническая термодинамика) на тему «Расчет теоретических циклов ДВС и ГТУ» / В.А. Тимофеев, О.В. Владецкий. – Севастополь: СевГУ, 2019. – 42 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам в овладении навыков применения полученных теоретических знаний при решении практических инженерных задач. Требования и рекомендации, изложенные в методических указаниях, направлены на углубление знаний и умений, предусмотренных требованиями Международной Конвенции ПДМНВ 78/95 с поправками 1995 г. (Раздел А-III/2).

УДК 536.7
ББК 39.46

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры ЭМСС, протокол № 1 от 31 августа 2018 года.

Допущено к изданию ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов направления подготовки 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» очной и заочной форм обучения.

© Тимофеев В.А., Владецкий О.В., 2019
© ФГАОУВО «Севастопольский
государственный университет», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Общие методические указания.....	4
1. Лабораторная работа «Определение теплоемкости воздуха».....	4
2. Лабораторная работа «Исследование фазового перехода «вода-пар».....	10
3. Лабораторная работа «Исследование процессов во влажном воздухе».....	18
4. Лабораторная работа «Истечение газа из сопла».....	25
Библиографический список.....	34
Приложение А. Молекулярные массы, плотности, объемы.....	35
Приложение Б. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара	36
Приложение В. I - S - диаграмма для водяного пара.....	40
Приложение Г. I - d - диаграмма для влажного воздуха.....	41
Приложение Д. Пример оформления титульного листа отчета	42

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Целью лабораторных работ является закрепление теоретического материала по курсу «Техническая термодинамика и теплопередача» и получение практических навыков проведения исследований и обработки результатов опытов.

На выполнение одной лабораторной работы отводится четыре академических часа. В течение этого времени студент знакомится с лабораторной установкой, получает допуск к проведению эксперимента, записывает в отчет показания приборов, производит обработку опытных данных, оформляет результаты исследования и защищает полученные результаты.

Для получения допуска к выполнению работы необходимо:

- иметь оформленный отчет к выполняемой работе;
- знать теоретические основы по теме работы;
- знать схему лабораторной установки и порядок проведения опытов.

Отчеты оформляются по каждой лабораторной работе на листах формата А4 в рукописном или машинописном виде с титульным листом согласно приложению Д. Защищенные отчеты сшиваются вместе и сдаются преподавателю.

Отчет должен содержать: наименование работы, цель, схему и краткое описание установки, основные формулы и формулировки, таблицы опытных данных и таблицы с результатами расчетов, необходимые графики и выводы.

Во время защиты лабораторной работы преподаватель проверяет правильность полученных студентом результатов и его теоретические знания.

К каждой лабораторной работе имеются контрольные вопросы, способствующие закреплению теоретического материала при самоподготовке студента.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА»

1.1 Цель и содержание работы

Ц е л ь: определение теплоемкости воздуха при атмосферном давлении методом проточного калориметра.

С о д е р ж а н и е: по расходу и температуре воздуха, измеренным в опыте, рассчитать средние массовую и объемную теплоемкости при постоянном давлении.

1.2 Основные сведения из теории

Физические тела и газы имеют разную тепловую емкость, т.к. при нагревании до одной и той же температуры тел или газов, имеющих одинаковую массу или объем, требуется затратить различное количество теплоты. Количество теплоты Q , воспринятое некоторым количеством вещества N будет прямо пропорциональным повышению его температуры на величину ΔT , т.е.

$$Q = C \cdot N \cdot \Delta T, \quad (1.1)$$

где C - коэффициент пропорциональности, называемый теплоемкостью тела.

Под удельной теплоемкостью вещества понимают количество теплоты, необходимое для нагревания единицы количества вещества на один Кельвин

$$c = \frac{Q}{N\Delta T}. \quad (1.2)$$

В зависимости от того, к какой единице количества вещества относится удельная теплоемкость (далее, теплоемкость) различают: массовую теплоемкость, отнесенную к 1 кг вещества. Единица массовой теплоемкости $[c] = \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; мольную c_m , отнесенную к 1 молю вещества. Единица мольной (мольной) теплоемкости $[c_m] = \text{кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$; объемную c' - отнесенную к количеству вещества, находящегося в 1 м^3 при нормальных физических условиях. Единица объемной теплоемкости $[c'] = \text{кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$.

Теплоемкость газа, как и подводимое к нему количество теплоты, является функцией процесса, совершаемого телом и в зависимости от вида процесса принимает соответствующее наименование. Так, теплоемкость газа в процессе подвода теплоты при постоянном давлении (изобарный процесс) называется изобарной и обозначается символом c_p . Теплоемкость газа в процессе подвода к нему теплоты при постоянном объеме (изохорный процесс) называют изохорной и обозначают c_v [1].

Теплоемкость газов, как и других тел, зависит от температуры, возрастая с ее увеличением. В зависимости от величины температурного интервала, в пределах которого к газу подводится теплота, получают различные значения теплоемкости. Теплоемкость, соответствующая бесконечно малому приращению температуры, называется истинной. В пределе это теплоемкость при данной температуре. Теплоемкость называется средней, если она измерена в конечном интервале температур $t_2 - t_1$. Среднюю теплоемкость принято обозначать символами $\bar{c}$ или c_m .

Теплоемкость является физической величиной. Значения теплоемкостей различных тел находятся по таблицам, составленным по опытным данным в интервале температур $(0...t \text{ } ^\circ\text{C})$.

1.3 Методы опытного определения теплоемкости

Существует ряд методов определения теплоемкости. В настоящей работе используется метод проточного калориметра, как наиболее распространенный. Сущность метода состоит в том, что через открытую обогреваемую трубу (калориметр) непрерывно прокачивается газ (в нашем случае - воздух) с постоянным расходом и при постоянном (атмосферном) давлении. Протекая по трубе, воздух нагревается.

Опытное значение теплоемкости находится из уравнения теплового баланса калориметра:

$$Q_w = c_{pm}G(t_2 - t_1) + Q_n, \quad (1.3)$$

где Q_w - поток теплоты, подведенной к калориметру или тепловая мощность нагревателя, кВт; c_{pm} — средняя массовая изобарная теплоемкость воздуха,

кДж/кг·К; G — расход воздуха через калориметр, кг/с; t_2 , t_1 — температура воздуха на выходе и на входе в калориметр, °С; Q_n — поток теплоты через изоляцию в окружающую среду, кВт.

Величины, входящие в уравнение (1.3), определяются следующим образом.

Тепловая мощность нагревателя задается преподавателем. Рекомендуемые значения Q_w указаны на схеме установки, имеющейся на стенде. Температуры t_2 , t_1 измеряются термометрами 3 и 4 (рисунок 1.1).

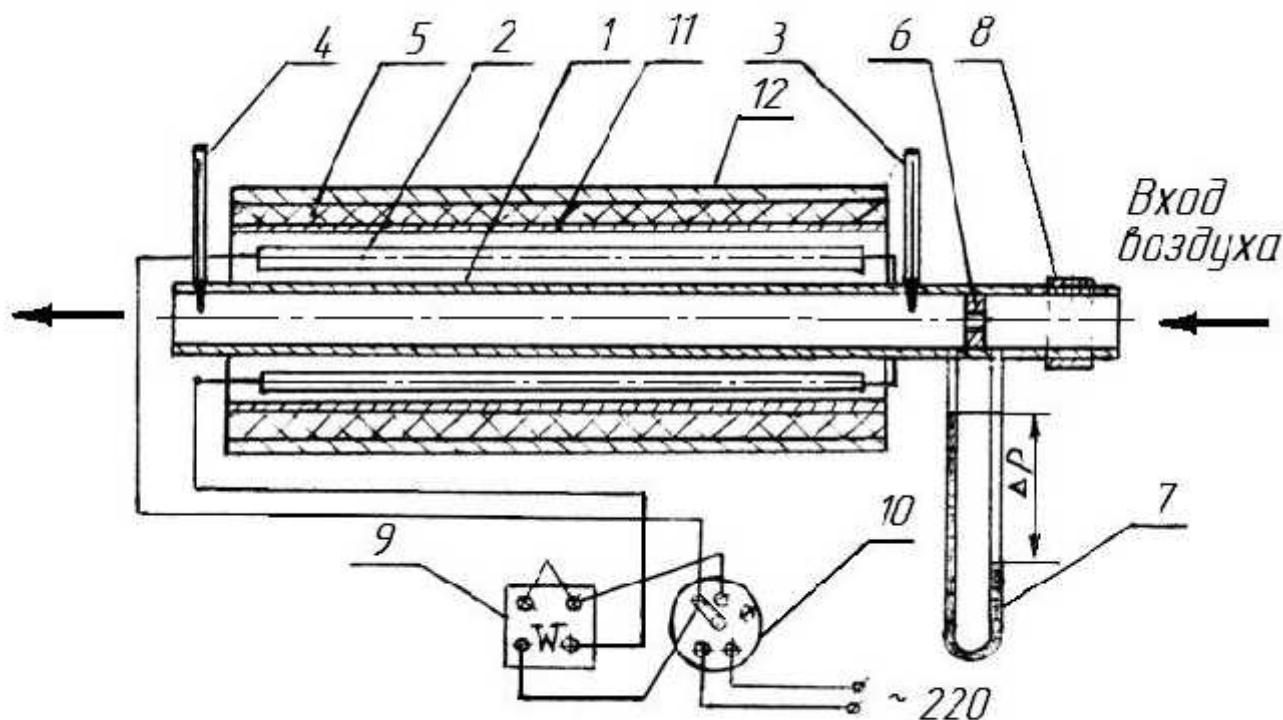


Рисунок 1.1 — Схема экспериментальной установки: 1 — труба-калориметр; 2 — нагреватель; 3, 4 — термометр; 5 — изоляция; 6 — дроссельная диафрагма; 7 — дифманометр; 8 — регулирующая втулка; 9 — ваттметр; 10 — автотрансформатор; 11 — промежуточная труба; 12 — наружная труба

Расход воздуха определяется по формуле

$$G = c_{\text{пр}} \sqrt{\Delta P}, \quad (1.4)$$

где $c_{\text{пр}}$ — постоянная дроссельного расходомера (ее значение указано на стенде); ΔP — перепад давления в дроссельной диафрагме 6, измеренный дифманометром 7, мм вод.ст.

Тепловая потеря Q_n учитывается коэффициентом $h < 1$ (Значение указано на стенде).

1.4 Экспериментальная установка

Опыт проводится на установках, размещенных на стендах ТПЗ-1 и ТПЗ-2. Схема установки изображена на рисунке 1.1.

Установка состоит из трубы 1, по которой вентилятором (на рис. 1.1 не показан) прокачивается с определенной скоростью воздух. Нагрев воздуха осуществляется электронагревателем 2, состоящим из нихромовых спиралей, растянутых вдоль трубы 1. Труба 1 вместе с нагревателем 2 помещена в трубу 11. Для уменьшения тепловых потерь в зазоре между трубами 11 и 12 размещена тепловая изоляция.

Для измерения расхода воздуха предусмотрено дроссельное устройство, состоящее из дроссельной диафрагмы 6 и жидкостного дифференциального манометра 7 (далее – дифманометр).

Изменение расхода воздуха через калориметр осуществляется при помощи регулирующей втулки 8. Вращением втулки открываются отверстия в трубе. Через эти отверстия и соответствующие отверстия во втулке часть воздуха удаляется в помещение и не проходит через калориметр.

Величина мощности нагревателя устанавливается по ваттметру 9 при помощи автотрансформатора 10.

1.5 Подготовка и выполнение опыта

Подготовка к опыту:

- ознакомиться с установкой, расположением ее составных частей и определить цену деления ваттметра и термометров;
- изучить инструкцию по эксплуатации установки;
- предъявить преподавателю подготовленный отчет о работе и получить допуск к проведению опыта и вариант согласно таблице 1.1;
- распределить обязанности между членами бригады.

Таблица 1.1

Вариант	Мощность нагревателя, Вт	Положение втулки 8	Вариант	Мощность нагревателя, Вт	Положение втулки 8
1	200	1, 2, 3	3	400	1, 2, 3, 4
2	300	1, 2, 3			

Примечание: допускается задавать другие значения мощности нагревателя в пределах, указанных в таблице.

Выполнение опыта:

- подключить электронагреватель к сети и при помощи автотрансформатора установить по ваттметру заданную мощность;
- пустить вентилятор. Порядок пуска вентилятора и включения нагревателя указан в инструкции, имеющейся на стенде;
- через 15 мин записать в таблицу измерений 1.2 показания термометров 3 и 4, дифманометра и ваттметра. Показания приборов записать 3...4 раза с интервалами между замерами 4 мин. При переходе на другое значение расхода воздуха или мощности нагревателя запись показаний приборов производить спустя 5...7 мин после переключения втулки 8 или установки нового значения

мощности;

- окончив опыты, заполнить все графы таблицы 1.2 и предъявить ее на подпись преподавателю.

Таблица 1.2

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

Номер замера	Время замера	Мощность Q_w , Вт	Температура		Показания			Расход $10^3 \cdot G$, кг/с
			t_1	t_2	ΔP_1	ΔP_2	$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2$	
1								
2								
3								
4								
Среднее								

1.6 Обработка результатов опыта

Обработка результатов опыта включает расчеты по определению теплоемкостей c_{pm} , c_{vm} и c_m , а также отношения $k = c_{pm}/c_{vm}$. Расчеты рекомендуется выполнять по форме таблицы 1.3.

Таблица 1.3

Определяемая величина	Источник или формула	Числовое значение
1. Мощность нагревателя Q_w , кВт	Таблица измерений	
2. Температура воздуха на входе t_1 , °C		
3. То же на выходе из трубы t_2 , °C		
4. Средняя температура воздуха t_{cp} , °C	$0,5(t_1 + t_2)$	
5. Плотность воздуха ρ , кг/м ³	$\frac{B}{R \cdot (t_{cp} + 273,15)}$	
6. Расход воздуха G , кг/с	$c_{пр} \sqrt{\Delta P}$	
7. Массовая изобарная теплоемкость воздуха c_{pm} , кДж/(кг·K)	$\eta Q_w \cdot 10^{-3} / [G(t_2 - t_1)]$	
8. Объемная теплоемкость c'_m , кДж/(м ³ ·K)	ρc_{pm}	
9. Массовая изохорная теплоемкость c_{vm} , кДж/(кг·K)	$c_{pm} - R$; $R = 0,287$	
10. Отношение теплоемкостей - показатель адиабаты, K	c_{pm} / c_{vm}	
11. Табличное значение c_{pm}^T , кДж/(кг·K)		1,007
12. Относительное отклонение $\Delta \bar{c}_p$	$ c_{pm} - c_{pm}^T / c_{pm}^T$	
13. Табличное значение показателя, k_T		1,4
14. Относительное отклонение $\Delta \bar{k}$	$ k - k_T / k_T$	

1.7 Контрольные вопросы для самопроверки

На допуск к работе:

1. Наименование, цель и содержание работы.
2. Устройство установки и последовательность проведения опыта.
3. Назначение приборов, используемых в опыте.
4. Единица теплоты, работы, энергии и мощности в системе СИ.
5. Определить мощность по показаниям ваттметра.
6. Выразить 15 ккал/кг в кДж/кг.
7. Что такое теплоемкость? Что она характеризует?
8. Мощность нагревателя 100 Вт. Определить тепловую энергию в килоджоулях, если опыт длился 10 мин.
9. Подведенная теплота равна 2588 Дж. Определить мощность нагревателя в ваттах, если нагрев производился в течение 12 мин.
10. Сущность метода проточного калориметра.
11. Какими приборами измеряется температура воздуха на входе и на выходе из калориметра?

К защите работы:

12. Какими параметрами характеризуется рабочее тело? Дать определение и указать единицы в системе СИ и внесистемные единицы.
13. Дать определение удельной теплоемкости и указать единицы массовой, мольной и объемной теплоемкостей.
14. Как определить массовую теплоемкость, если известна мольная?
15. Как определить внутреннюю энергию и энтальпию идеального газа, если известна его температура?
16. Чему равна теплоемкость тела в процессах, протекающих при $T = \text{const}$ и $Q = 0$?
17. Написать формулу для определения средней теплоемкости в известном температурном интервале ($t_2 - t_1$).
18. Что такое теплоемкость газа? Дать определение истинной и средней теплоемкости.
19. Имеется ли различие между объемной теплоемкостью и теплоемкостью при постоянном объеме?
20. Доказать, что теплоемкость изотермического процесса равна бесконечности, а адиабатного - нулю.
21. В каких пределах может изменяться теплоемкость газа?
22. Что такое мольная теплоемкость? Указать единицу этой теплоемкости и связь ее с массовой теплоемкостью.
23. Как графически определяется средняя теплоемкость?

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА «ВОДА-ПАР»»

2.1 Цель и содержание работы

Ц е л ь: изучение термодинамических свойств водяного пара с определением параметров его состояния на линии насыщения при фазовом переходе «вода-пар».

С о д е р ж а н и е: по давлению и температуре кипения воды в котле построить кривую насыщения в координатах T, P с определением теплоты парообразования, энтальпии и энтропии воды и пара на линии насыщения.

2.2 Основные сведения из теории

Фазовый переход, при котором жидкая фаза превращается в паровую, называется процессом парообразования. Парообразование, которое происходит только с поверхности жидкости при любой температуре называется испарением. При испарении температура жидкости понижается, т.к. в жидкость покидают молекулы, обладающие сравнительно большими скоростями, вследствие чего уменьшается средняя скорость движения оставшихся в жидкости молекул.

При сообщении жидкости теплоты увеличивается ее температура и интенсивность испарения. При достижении некоторой температуры, зависящей от физических свойств жидкости и давления, процесс парообразования происходит не только с поверхности жидкости, но и во всей ее массе. Это явление называется кипением жидкости. Если процесс кипения происходит в закрытом сосуде, то по мере заполнения паром свободного пространства увеличивается интенсивность возврата части молекул из парового пространства в кипящую жидкость. Когда число молекул, покидающих жидкость, становится равным числу молекул возвращающихся в нее обратно, в паровом пространстве наступает равновесное состояние, при котором в паровом пространстве находится максимально возможное число молекул. Пар при этом состоянии имеет максимальную плотность и называется насыщенным. Насыщенный пар, содержащий взвешенные высокодисперсные частицы жидкой фазы, равномерно распределенные по всей его массе, называется влажным насыщенным паром. При отсутствии в паре частиц жидкой фазы пар называется сухим насыщенным. Массовая доля кипящей жидкой фазы во влажном насыщенном паре называется степенью влажности. Массовая доля сухого пара во влажном называется степенью сухости x :

$$x = \frac{m_{c.n.}}{m_{c.n.} + m_{ж}}, \quad (2.1)$$

где $m_{c.n.}$ – масса сухого насыщенного пара, кг;

$m_{ж}$ – масса кипящей жидкой фазы, кг.

Если сухому насыщенному пару сообщить некоторое количество теплоты при постоянном давлении, то получим перегретый пар, который при данном давлении имеет более высокую температуру, чем сухой. Перегретый пар над по-

верхностью жидкости получить нельзя. Перегретый пар является не насыщенным, т.к. удельный объем перегретого пара больше удельного объема сухого насыщенного пара, а плотность меньше. По своим физическим свойствам перегретый пар приближается к газу.

Температура, при которой происходит процесс парообразования, называется температурой насыщения. Ее обозначают t_s или t_n .

Переход твердого вещества в газообразное состояние называется процессом сублимации, а переход из твердого состояния в жидкое – процессом плавления.

Для наглядности и практического использования фазовые состояния веществ изображают на диаграммах в различных координатных системах. На рис. 2.1 изображена диаграмма состояния воды в координатах p, T .

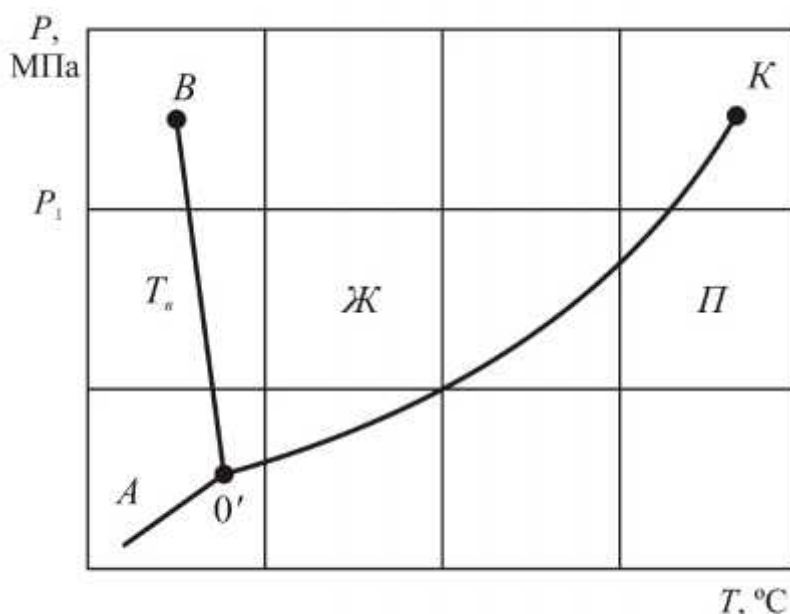


Рисунок 2.1 – Фазовая p, T диаграмма для воды

На этой диаграмме состояния, соответствующие фазовым переходам, изображаются линиями. Так, равновесное состояние жидкости и пара изображается линией $О'К$, которая называется “кривой насыщения”. Конечной точкой этой кривой служит критическая точка $К$, в которой исчезают физические различия между жидкостью и паром. Начало кривой насыщения определяется тройной точкой $О'$, в которой все три фазы (твердая, жидкая и парообразная) находятся в равновесном состоянии. Линии $АО'$ и $О'В$ являются соответственно линиями сублимации и плавления.

На рис. 2.2 изображены фазовые диаграммы воды в координатах $p-v$, $T-s$ и $h-s$. На этих диаграммах фазовые переходы представляют собой область, ограниченную кривыми, соединяющими точки равновесного состояния вещества в начале и в конце фазового перехода при различных давлениях. Так, двухфазная область “жидкость-пар” (процессы парообразования) ограничена кривыми $СК$ и $ДК$, которые принято называть нижней и верхней пограничными кривыми, при этом кривая $СК$ соединяет точки, которые соответствуют началу парообразования (вода в состоянии насыщения) при различных давлениях, а кривая $ДК$ со-

единяет точки, в которых вода находится в состоянии сухого насыщенного пара. В точке K – критической точке, где отсутствуют физические отличия между кипящей жидкостью и сухим насыщенным паром, эти кривые соединяются.

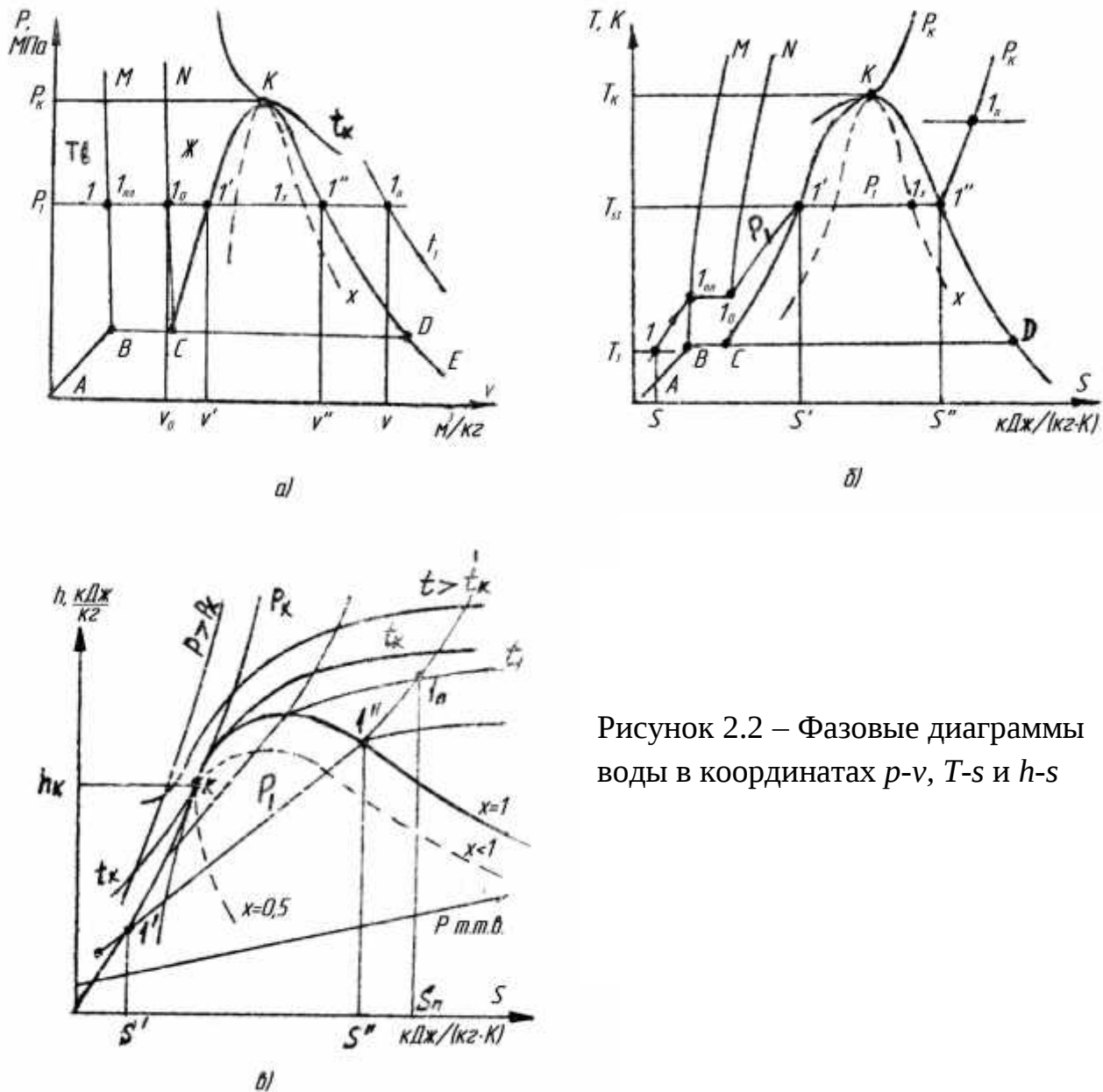


Рисунок 2.2 – Фазовые диаграммы воды в координатах $p-v$, $T-s$ и $h-s$

В качестве примера на диаграммах изображены фазовые переходы вещества из твердого состояния в точке 1 при давлении P до состояния перегретого пара в точке $1_{\text{п}}$. Линии BM и CN ограничивают двухфазную область “лед-вода” и соединяют точки равновесного состояния воды в начале и в конце процесса плавления. Область сублимации льда ограничена линией $ABDE$ и соответствующей горизонтальной осью диаграмм. Линия BCD соответствует тройной точке, т.е. равновесному состоянию трех фаз.

Правее верхней пограничной кривой KD на рассматриваемых диаграммах вещество находится в состоянии перегретого пара.

Состояние влажного насыщенного пара определяется двумя параметрами - давлением (или температурой) и степенью сухости. Удельный объем, внутренняя энергия, энтальпия и энтропия влажного насыщенного пара обозначаются через

v_x , u_x , i_x и s_x . Состояние сухого насыщенного пара определяется одним параметром - давлением или температурой. Соответственно удельный объем, внутренняя энергия, энтальпия и энтропия сухого насыщенного пара обозначаются через v'' , u'' , i'' и s'' . Состояние перегретого пара определяется двумя независимыми параметрами - давлением и температурой, соответствующие этому состоянию величины обозначаются через v , u , i и s . Для кипящей жидкости, состояние которой соответствует нижней пограничной кривой (на рис. 2.2 кривая при $x = 0$), удельный объем v' , энтальпия i' и энтропия s' берутся из таблиц насыщенного пара по давлению или температуре. В таблицах насыщенного пара приводятся параметры для сухого пара v'' , i'' , s'' , а также r — теплота парообразования, которая показывает какое количество теплоты затрачивается на парообразование 1 кг кипящей воды до состояния сухого насыщенного пара.

Функции состояния энтальпия и энтропия сухого насыщенного пара могут быть определены по формулам без использования таблиц насыщенного пара.

$$h'' = h' + r, \quad (2.2)$$

$$h' = c_{pm} \cdot t_s, \quad (2.3)$$

c_{pm} — средняя массовая изобарная теплоемкость воды на линии насыщения, кДж/кг·К; t_s — температура насыщения, °С.

Теплота парообразования вычисляется по уравнению (2.4) Клапейрона-Клаузиуса, применяя метод графического дифференцирования кривой насыщения, построенной по опытным значениям данной лабораторной работы.

$$r = \frac{\partial P}{\partial T_s} T_s (v'' - v'). \quad (2.4)$$

Энтропия сухого насыщенного пара s'' определится из уравнения второго закона термодинамики

$$s'' = s' + \frac{r}{T_s}, \quad (2.5)$$

$$\text{где } s' = c_{pm} \ln \frac{T_s}{273,16}. \quad (2.6)$$

2.3 Описание экспериментальной установки

Опыты по измерению температуры кипения при различных давлениях пара проводятся на установках ТД2-1 и ТД2-2, размещенных на стенде «ПУ».

Установки имеют одинаковую конструкцию и различаются объемом воды в котлах и мощностью электронагревателей.

Установка, схема которой изображена на рис. 2.3, представляет собой цилиндрический котел небольшого объема. Внутри котла размещены нагреватели ЭН.

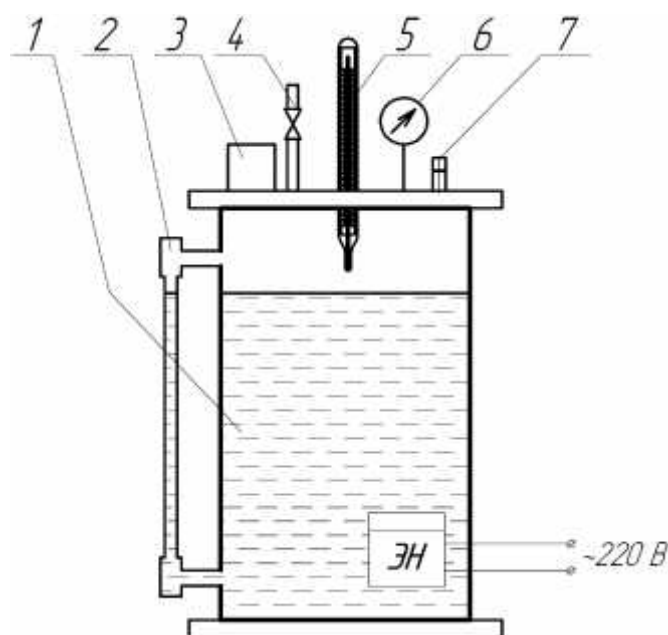


Рисунок 2.3 – Схема экспериментальной установки: 1 - котел; 2 - указатель уровня; 3 - предохранительный клапан; 4 - воздушный клапан; 5 - термометр; 6 - манометр; 7 - штуцер; ЭН - электронагреватель

На крышке котла размещены: термометр 5 и манометр 6, которые измеряют температуру и давление пара в котле; воздушный клапан 3 для выпуска воздуха из котла; предохранительный клапан 4, ограничивающий давление пара в котла; штуцер, закрытый пробкой. Через штуцер производится заполнение котла водой. Уровень воды в котле контролируется указателем 2.

2.4 Подготовка и выполнение опыта

Подготовка к опыту:

- изучить установку. Определить цену деления манометра и термометра;
- изучить инструкцию, имеющуюся на стенде «ПУ» и действовать в соответствии с ее требованиями;
- по указателю 2 определить уровень воды в котле, который должен быть не ниже отметки «СУ». Долив котла водой выполняет лаборант до начала занятий;
- получить от преподавателя интервал давлений, в пределах которого будет проводиться опыт;
- записать в таблицу измерений (таблица 2.1) барометрическое давление.

Выполнение опыта:

- открыть клапан 3;
- включить нагреватель. Порядок включения указан в инструкции;
- при достижении воды в котле $95...97^{\circ}\text{C}$, закрыть клапан 3 и наблюдать по манометру повышение давления пара в котле. Когда оно станет равным $0,5 \text{ кгс/см}^2$, записать в таблицу 2.1 значение давления и соответствующую величину температуры по термометру 5. Далее, через каждые $0,5...1,0 \text{ кгс/см}^2$, записать 5-6 значений давления и температуры;
- по окончании всех записей выключить нагреватель, руководствуясь инструкцией;
- предъявить преподавателю заполненную таблицу измерений.

Таблица 2.1

В = _____ мм рт.ст

Давление $P_{1м}$ кгс/см ²						
Температура t_s , °C						

2.5 Обработка результатов опыта

Обработка результатов опыта включает:

- построение кривой насыщения в координатах P , T ;
- определение теплоты парообразования, энтальпии и энтропии воды и пара на линии насыщения и сравнение их с табличными значениями;
- построение графиков зависимости указанных выше параметров от давления (или температуры насыщения).

Кривую насыщения строят на листе миллиметровой бумаги в крупном масштабе, при этом сперва на поле графика проставляют опытные точки, а затем по лекалу проводят плавную кривую. По оси давлений следует откладывать абсолютные значения давлений, а по оси T – температуру в градусах Цельсия или Кельвина.

При расчете теплоты парообразования входящие в формулу (2.4) величины $\partial P/\partial T_s$, T_s , v'' и v' находятся следующим образом.

Производная $\partial P/\partial T_s$ заменяется отношением конечных разностей $\Delta P/\Delta T_s$. В результате расчетная формула определения теплоты парообразования приобретет вид

$$r = \frac{\Delta P}{\Delta T_s} T_s (v'' - v'). \quad (2.7)$$

На кривой насыщения (рисунок 2.4) намечают 5...6 значений температуры T_s и по графику определяют соответствующие им значения давлений. Затем задаются разностью $\Delta T_s = 1...3$ °C, откладывают ее по обе стороны от принятой температуры T_s . Проектируя эту разность на ось P , находят соответствующую разность давлений ΔP .

Удельный объем пара v'' существенно зависит от давления и уменьшается с его повышением. Значения v'' приводятся в таблицах термодинамических свойств воды и водяного пара. В интервале 0,1...2,0 МПа объем может быть определен по эмпирической формуле

$$v'' = 0,196 \cdot P^{-0,94}, \quad (2.8)$$

где P - абсолютное давление, МПа, которое находится по кривой насыщения по принятой температуре T_s .

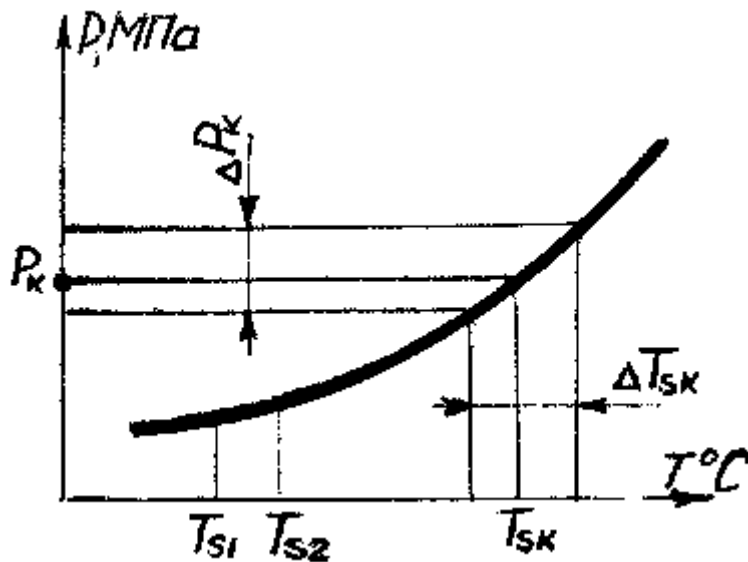


Рисунок 2.4 – Кривая насыщения

При этом следует иметь в виду, что, если при построении кривой насыщения за единицу давления принят МПа (мегапаскаль), то в формулу (2.7) надо ввести множитель 10^3 , чтобы результат получился в кДж/кг (килоджоулях на килограмм).

Удельный объем v' воды в широком интервале изменяется незначительно, поэтому при расчетах его можно принять постоянным и равным $0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Энтальпия и энтропия воды и пара находятся по формулам (2.2)...(2.6). Значения теплоемкости C_{pm} определяется по таблице 2.2.

Таблица 2.2

$t_s, ^\circ\text{C}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
$C_{pm}, \text{кДж/кг}\cdot\text{К}$	4,22	4,23	4,25	4,26	4,28	4,32	4,34	4,37	4,42	4,46

Результаты расчетов рекомендуется выполнять по форме таблицы 2.3.

Таблица 2.3

Определяемая величина	Источник или формула	Числовое значение					
		1	2	3	4	5	6
Температура насыщения T_s , К	Принята						
Разность температур ΔT_s , К							
Абсолютное давление P , МПа	Кривая насыщения						
Разность давлений ΔP , МПа							
Удельный объем пара v'' , $\text{м}^3/\text{кг}$	$0,196 \cdot P^{-0,94}$						
Теплота парообразования r , кДж/кг	$r = \frac{DP}{DT_s} T_s (v'' - v')$ *						
То же, табличные значения r_T , кДж/кг	Таблицы свойств воды и водяного пара						

Продолжение таблицы 2.3

Определяемая величина	Источник или формула	Числовое значение					
		1	2	3	4	5	6
Относительное отклонение	$\Delta r = r - r_T /r_T$						
Теплоемкость воды c_{pm} , кДж/(кг·К)	Таблица 2.2						
Энтальпия воды h' , кДж/кг	$c_{pm}t_s$						
Энтальпия пара h'' , кДж/кг	$h' + r$						
То же, табличное значение h''_T (i''_T), кДж/кг	Таблицы свойств воды и водяного пара (приложение А)						
Относительное отклонение	$ h'' - h''_T /h''_T$						
Энтропия воды s' , кДж/(кгК)	$c_{pm} \ln \frac{T_s}{273,16}$						
Энтропия пара s'' , кДж/(кгК)	$s' + \frac{r}{T_s}$						
То же, табличное значение s'' , кДж/(кгК)	Таблицы свойств воды и водяного пара (приложение А)						
Относительное отклонение	$ s'' - s''_T /s''_T$						

* Множитель 10^3 вводится, когда ΔP измерено в МПа.

2.6 Контрольные вопросы для самоподготовки

На допуск к работе:

- 1 Наименование и содержание работы.
- 2 Устройство установки.
- 3 Цена деления приборов, используемых в работе. С какой точностью можно измерить давление и температуру пара в котле?
- 4 Для какой цели определяют барометрическое давление воздуха. Выразить 770 мм рт. ст. в паскалях, мегапаскалях и в кгс/см².
- 5 Какие величины измеряют в опыте?
- 6 Что выражает кривая насыщения? Для какой цели ее строят?
- 7 Выразить 596 ккал/кг в килоджоулях и мегаджоулях.
- 8 Назвать единицы энтальпии и энтропии.
- 9 Перевести 100 ккал/ч в ватты.
- 10 Назвать единицы теплоты, энергии, работы и энтропии.
- 11 Как определяют величины ΔP и ΔT , входящие в формулу для определения теплоты парообразования.
- 12 Пользуясь h , S диаграммой, определить температуру насыщения при давлении 5 кгс/см² (0,5 МПа) (см. приложение Б).

К защите работы:

- 13 Как называются точки начала и конца кривой насыщения? Указать особенности этих точек.
- 14 Изобразить диаграмму фазовых состояний воды в координатах P , T . Назвать линии раздела фаз.
- 15 Какое состояние вещества называется критическим? Чему равны теплота парообразования в критическом состоянии?
- 16 Дать определение теплоты парообразования. Как ее определить, если построена кривая насыщения?
- 17 Что такое температура насыщения и состояние насыщения?
- 18 Что называется влажным насыщенным и сухим насыщенным паром? Имеются ли между ними различия и какие?
- 19 Как влияет давление на теплоту жидкости и теплоту парообразования?
- 20 Какой пар называется перегретым? В чем основное отличие перегретого пара от насыщенного?

3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ»

3.1 Цель и содержание работы

Ц е л ь: изучение процессов подогрева и увлажнения воздуха с определением его параметров.

С о д е р ж а н и е: определить температуру, относительную влажность, влагосодержание, энтальпию и парциальное давление воздуха в начале и в конце процессов подогрева и увлажнения. Построить процессы в диаграмме $h-d$. Сопоставить расчетные данные с данными, полученными по диаграмме.

3.2 Основные сведения из теории

Смесь сухого воздуха с водяным паром называется влажным воздухом.

Водяной пар может находиться либо в перегретом, либо в насыщенном состоянии. Если во влажном воздухе пар находится в перегретом состоянии, то воздух называется влажным ненасыщенным. Воздух, содержащий пар в насыщенном состоянии, называется влажным насыщенным воздухом.

Параметрами, характеризующими состояние влажного воздуха, являются: давление, температура, влагосодержание и влажность.

Влагосодержанием называют отношение

$$d = m_{\text{п}} / m_{\text{с.в.}} = \rho_{\text{п}} / \rho_{\text{с.в.}}, \quad (3.1)$$

где d – влагосодержание, кг/кг сухого воздуха;

$m_{\text{п}}$, $m_{\text{с.в.}}$ – соответственно, масса пара и сухого воздуха, кг;

$\rho_{\text{п}}$, $\rho_{\text{с.в.}}$ – плотности пара и сухого воздуха, кг/м³.

Влажность воздуха может быть абсолютной и относительной.

Абсолютной влажностью называют количество пара, содержащегося в 1 м^3 воздуха, т.е. она равна плотности пара.

Относительной влажностью воздуха называют отношение

$$\varphi = \rho_{\text{п}} / \rho_{\text{п.н.}} \quad (3.2)$$

Выражая величины $\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{пн}}$ из уравнения состояния для идеальных газов и подставляя их в формулы (3.1) и (3.2), получим:

$$d = 0,622 \frac{p_{\text{п}}}{B - p_{\text{п}}}, \quad (3.3)$$

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{п.н.}}}, \quad (3.4)$$

где B – давление воздуха по барометру, Па;

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

$p_{\text{пн}}$ – давление насыщенного пара при температуре воздуха, Па.

Процессы изменения состояния влажного воздуха изображают на h, d диаграмме. На этой диаграмме (см. приложение В) по оси абсцисс отложены значения влагосодержания d в граммах на 1 кг сухого воздуха, а по оси ординат – значения энтальпии влажного воздуха. Линии постоянной энтальпии влажного воздуха наклонены под углом 45° .

На диаграмме нанесены также линии постоянной относительной влажности $\varphi = \text{const}$, изотермы сухого термометра и кривая парциального давления пара.

Процесс нагрева воздуха на h, d диаграмме изображается вертикальной прямой 1-2, так как этот процесс протекает при постоянном влагосодержании. Процесс адиабатного увлажнения воздуха или сушки материала протекает при постоянной энтальпии и изображается линией 2-3, параллельной линиям $h = \text{const}$.

3.3 Описание экспериментальной установки

Опытное исследование процессов нагревания и увлажнения воздуха (сушка материала) выполняется на установках, размещенных на стендах ТДЗ-1 и ТДЗ-2. Обе установки одинаковы по конструкции. Схема установки изображена на рисунке 3.1. В ее состав входят: проточная труба (калорифер) 1, в которой вмонтирован электронагреватель (ТЭН) 2; камера увлажнения 3, в которой уложен слой материала, увлажняемый наливом воды в камеру; автотрансформатор 8, предназначенный для регулирования мощности нагревателя; вентилятор (на схеме не показан).

Установка работает следующим образом. Холодный воздух вентилятором подается в трубу 1. Протекая по трубе, воздух нагревается и подается в камеру 3. Омывая слой мокрого материала, воздух осушает материал, в результате чего увлажняется и охлаждается. Температура нагретого воздуха (перед камерой) определяется по термометру 5, а за камерой — по термометру 6.

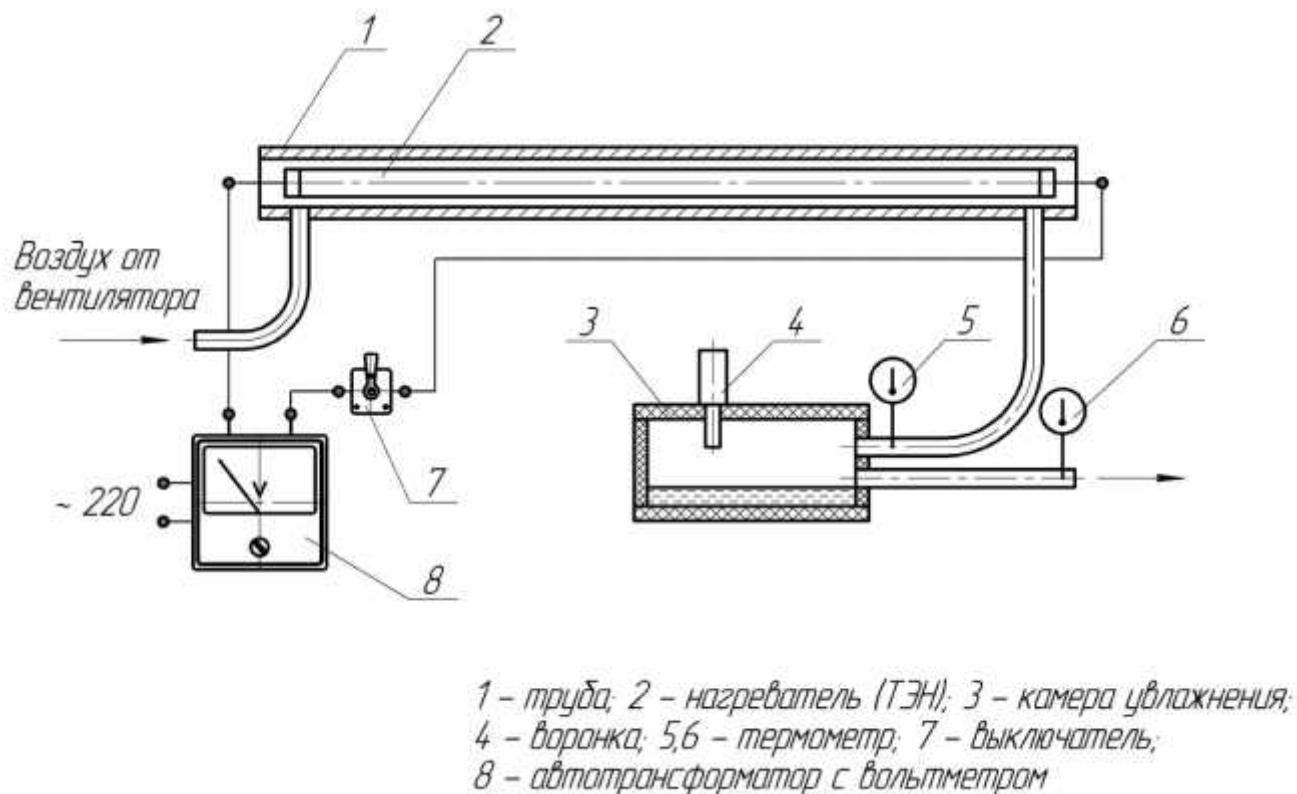


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки

3.4 Подготовка и выполнение опыта

Подготовка к опыту:

- налить в камеру 3 воду так, чтобы она слегка покрывала слой материала;
- подготовить психрометр к работе. Для этого баллончик с ртутью одного из термометров обернуть мокрой тонкой тряпочкой;
- определить и записать барометрическое давление.

Проведение опыта:

- включить нагреватель в сеть и с помощью автотрансформатора 8 установить по вольтметру напряжение 100...130 В для установки ТДЗ-1 и 100...110 В для установки ТДЗ-2;
- завести вентилятор психрометра и через 4...5 мин. определить и записать в таблицу 3.1 показания сухого и мокрого термометров;
- пустить вентилятор, руководствуясь инструкцией, имеющейся на стенде, и через 4...6 мин. начать записывать показания термометров 5 и 6. Запись повторить 3-4 раза с интервалом 2...3 мин. между измерениями.

Таблица 3.1

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

Номер замера	Показания психрометра		Относительная влажность j_1 , %	Показания термометров	
	t_{1M}	t_{1C}		t_2	t_3
1					
2					
3					
средн.					

3.5 Обработка результатов опыта

Обработка результатов опытов включает:

- построение процессов нагревания и увлажнения воздуха (или сушки материала) на h, d диаграмме;
- расчет по приведенным выше формулам в построенных точках h, d диаграммы и сравнение их величин со значениями, снятыми с диаграммы;
- определение количества теплоты и расхода воздуха для испарения 1 кг влаги;

Построение процессов нагревания и увлажнения воздуха на h, d диаграмме производится следующим образом. По осредненным показаниям психрометра находим на h, d диаграмме точку 1, которая характеризует состояние воздуха при входе в калорифер. Из точки 1 проводим вертикальную прямую 1-2 до пересечения с изотермой t_2 , соответствующей осредненной температуре, измеренной термометром 5. Полученная точка 2 характеризует состояние воздуха при выходе из калорифера или на входе в камеру увлажнения (осушения). Из точки 2 проводим изоэнтальпу $h = \text{const}$ до пересечения с изотермой t_3 , соответствующей осредненной температуре, измеренной термометром 6. Полученная точка 3 характеризует состояние воздуха при выходе из камеры увлажнения.

Парциальное давление пара находится по графику (рисунок 3.2), либо по шкале, приведенной на h, d диаграмме.

Теоретическое значение энтальпии влажного воздуха находится по формуле

$$h = c_{\text{рв}} \cdot t_c + d(2500 + 1,96 \cdot t_c), \quad (3.5)$$

где $c_{\text{рв}}$ – изобарная теплоемкость сухого воздуха, кДж/(кг·К);

t – температура воздуха в точках 1, 2 и 3.

Теплоемкость сухого воздуха в интервале температур 50...100 °С практически от температуры не зависит и ее можно принять равной $c_{\text{рв}} = 1$ кДж/(кг·К).

Результаты расчетов рекомендуется оформлять по форме таблицы 3.2.

Таблица 3.2

Определяемая величина	Источник или формула	Числовые значения		
		1	2	3
Температура воздуха t_c , °С	Таблица 3.1			
Относительная влажность φ , %	Таблица 3.1			
Давление $p_{\text{пн}}$ насыщенного пара при t_c , кПа	Рисунок 3.3 или по табл. насыщ. паров			
Парциальное давление пара $p_{\text{п}}$, кПа	$\varphi \cdot p_{\text{пн}}$			
Тоже по h, d диаграмме $p_{\text{п}}^*$, кПа	h, d диаграмма			
Относительное отклонение $\overline{\Delta p}$	$ p_{\text{п}} - p_{\text{п}}^* / p_{\text{п}}$			
Влагосодержание d , кг/кг с.в.	$0,622 \cdot p_{\text{п}} / (B - p_{\text{п}})$			
Тоже по h, d диаграмме d' , кг/кг с.в.	h, d диаграмма			

Продолжение таблицы 3.2

Относительное отклонение $\overline{\Delta d}$	$ d - d' / d$			
Энтальпия воздуха h , кДж/кг	$t_c - d \cdot (2500 + 1,96 \cdot t_c)$			
Тоже по h, d диаграмме h' , кДж/кг	h, d диаграмма			
Относительное отклонение $\overline{\Delta h}$	$ h - h' / h$			
Количество испарившейся влаги Δd , кг/кг с.в.	$d_3 - d_1$			
Количество воздуха, необходимого для испарения 1 кг влаги, кг	$m_B = 1/\Delta d$			
Количество теплоты, необходимого для испарения 1 кг влаги, кДж/кг	$q = m_B (h_2' - h_1')$			

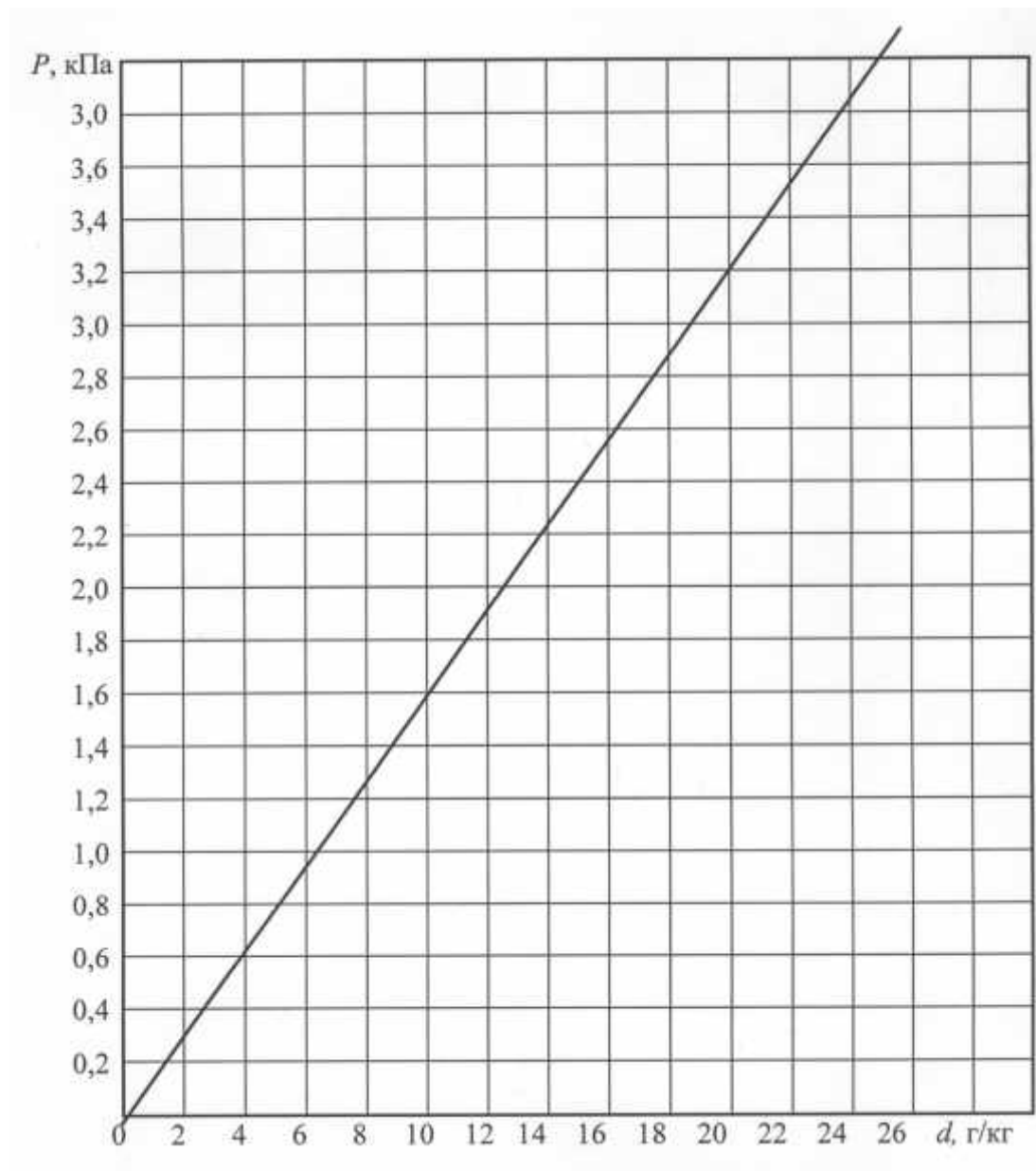


Рисунок 3.2 – Зависимость парциального давления пара от влагосодержания

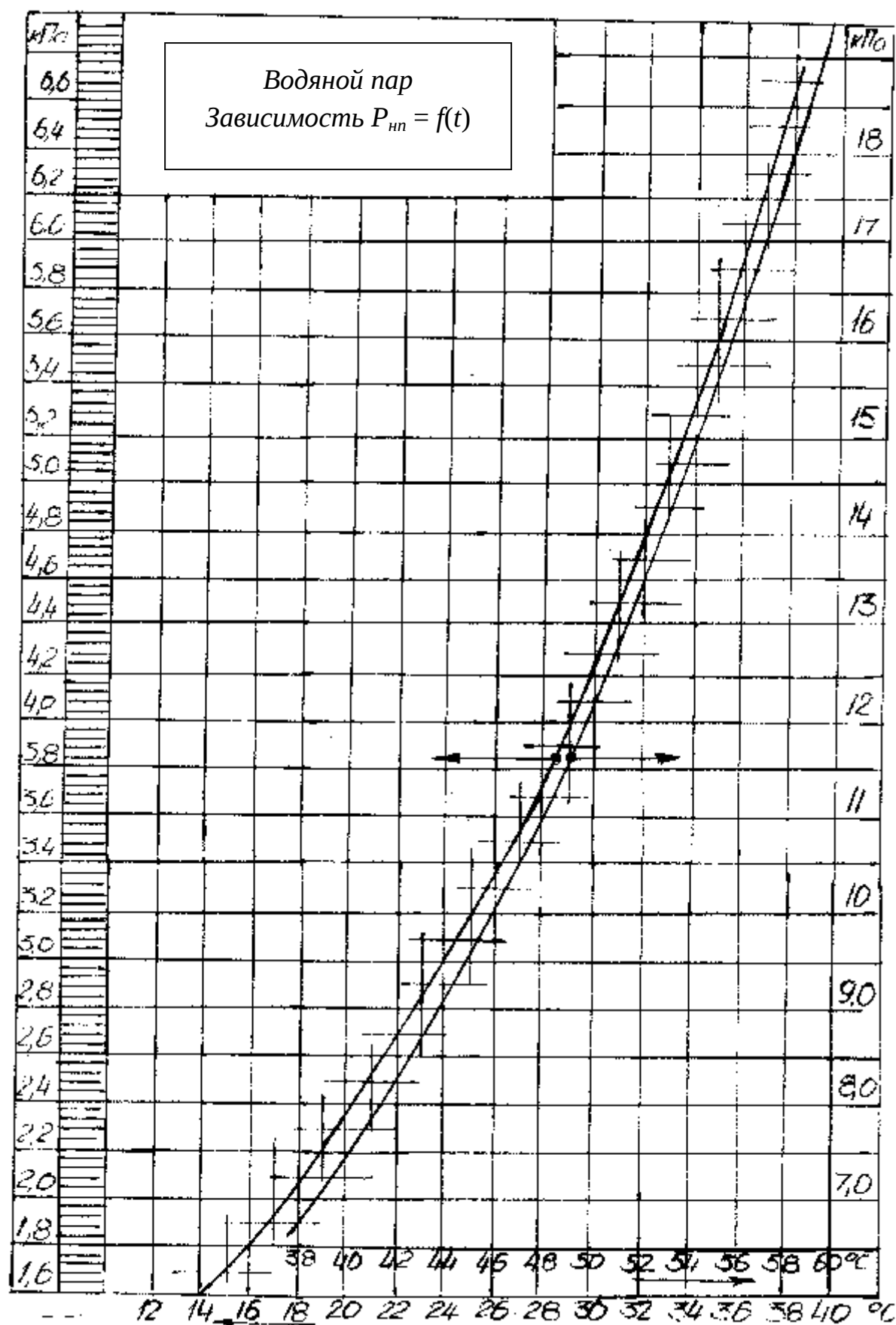


Рисунок 3.3 – Зависимость давления насыщенного пара от температуры

3.6 Контрольные вопросы для самопроверки

На допуск к работе:

- 1 Рассказать устройство и назначение психрометра.
- 2 Как определяется относительная влажность наружного воздуха?
- 3 Дать наименование, цель содержание работы.
- 4 Как по h, d диаграмме определяются параметры воздуха?
- 5 Как устроена экспериментальная установка?
- 6 Приборы, используемые в работе, их назначение.
- 7 Какие параметры определяются в процессе выполнения опыта?
- 8 Барометрическое давление $B = 770$ мм рт.ст. выразить в мега и килопаскалях.
- 9 Для какой цели определяется атмосферное давление воздуха?
- 10 Выразить 1 кгс/см^2 в мм рт.ст. и килопаскалях.

К защите работы:

- 11 Пользуясь h, d диаграммой, определить состояние воздуха после увлажнения.
- 12 По замеренным в опыте величинам определить парциальное давление пара в воздухе перед входом его в калорифер.
- 13 Что такое влагосодержание? Как определить эту величину по h, d диаграмме?
- 14 Что такое относительная влажность? Как она определяется в опыте?
- 15 Как по h, d диаграмме определить относительную влажность нагретого и увлажненного воздуха?
- 16 Назвать состояние влажного воздуха.
- 17 Чему равно наибольшее парциальное давление пара во влажном воздухе заданной температуры?
- 18 Указать методы определения парциального давления пара во влажном воздухе.
- 19 Как определяется давление насыщенного пара во влажном воздухе?
- 20 Как определить парциальное давление сухого воздуха?
- 21 Изобразить процессы нагрева и увлажнения воздуха на h, d диаграмме.
- 22 Что такое точка росы? Как определяется температура точки росы?
- 23 Как осушить влажный воздух - показать процесс осушения на h, d диаграмме.
- 24 Написать формулу для определения влагосодержания воздуха. Как определяются величины, входящие в формулу?
- 25 Задано уравнение $\phi = p_{\text{п}}/p_{\text{пн}}$. Что оно выражает? Как определить величины, входящие в формулу?
- 26 Почему относительная влажность воздуха на выходе из калорифера стала меньше, чем на входе в калорифер?
- 27 Как влияет температура воздуха на относительную влажность?
- 28 Можно ли осуществить сушку материала влажным насыщенным воздухом?

4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗА ИЗ СОПЛА»

4.1 Цель и содержание исследования

Ц е л ь: практическое изучение термодинамики газового потока и методов опытного определения параметров потока газа (воздуха) при истечении его из суживающегося сопла.

С о д е р ж а н и е:

- определение давления и температуры в потоке газа перед и за соплом при различных отношениях p_2/p_1 ;
- определение действительного расхода газа через сопло на тех же режимах;
- определение скорости и теоретического расхода газа, а также коэффициентов скорости и расхода.

4.2 Основные сведения из теории

Поток газа (жидкости) – это непрерывное перемещение массы газа (жидкости) с конечной скоростью по каналам и трубам под действием перепада давлений, а также при обтекании твердых тел.

Величинами, характеризующими поток газа, являются скорость и термические параметры состояния: давление p , температура T и удельный объем v .

Масса газа, протекающего через какое-либо поперечное сечение потока в единицу времени, называется массовым расходом газа (далее расход газа). Его обозначают символом G . Единица расхода $[G] = \text{кг/с}$.

Объемным расходом называют величину vG , где v – удельный объем газа. Единица объемного расхода $[vG] = \text{м}^3/\text{с}$.

В данной работе рассматриваются стационарный (установившийся) одномерный поток, когда скорость, давление, температура и другие параметры не зависят от времени, а их значения, переменные в поперечном сечении потока, заменяются средними величинами. При этом предполагается, что теплообмен с внешней средой отсутствует.

Из сказанного следует, что в одномерном стационарном потоке скорость и параметры состояния изменяются только по направлению потока, при этом расход газа не меняется.

Соплом называется короткий канал переменного поперечного сечения, предназначенный для преобразования внутренней энергии газа в кинетическую энергию потока, при этом скорость газа возрастает, давление, температура и плотность газа уменьшаются, т.е. газ расширяется.

Скоростью истечения газа из сопла называют среднюю скорость потока, которая устанавливается в выходном сечении сопла. Ее величина зависит от рода рабочего тела, начальных параметров и перепада давления $\Delta p = p_1 - p_2$, где p_1 и p_2 – давление газа на входе и на выходе из сопла, и может быть как меньше, так и больше местной скорости звука – скорости распространения слабых возмущений в сжимаемой среде, определяемой по формуле

$$a = \sqrt{kp\nu}, \quad (4.1)$$

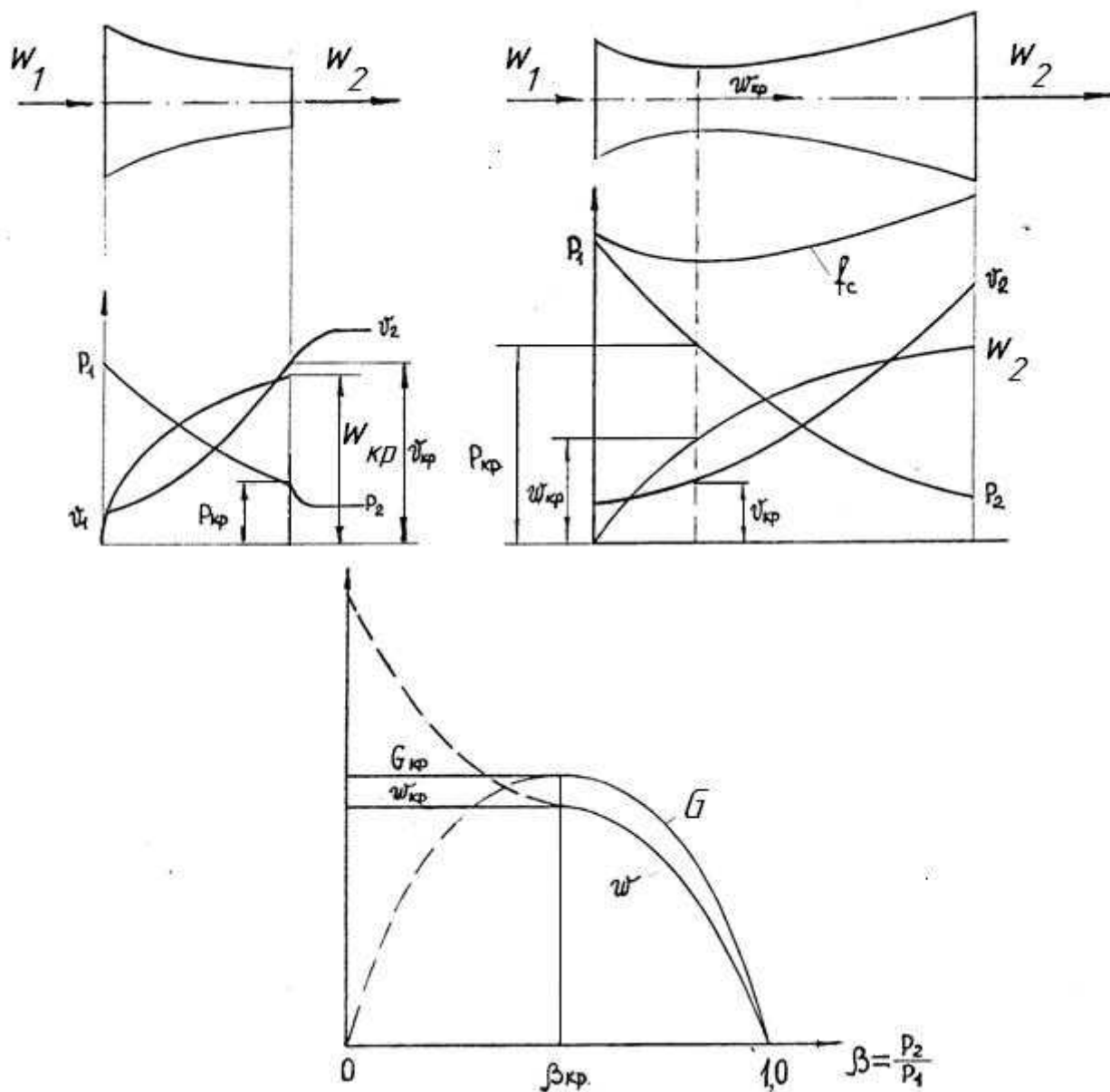
где a – местная скорость звука, т.е. скорость звука в произвольно выбранном сечении, м/с;

k – показатель адиабаты (изоэнтропы), для воздуха и двухатомных газов $k = 1,4$;

p – давление газа в выбранном сечении, Па;

ν – удельный объем газа в том же сечении, м³/кг.

Сопла, в которых поток газа ускоряется до скорости, не превышающей местной скорости звука, называются дозвуковыми. Их называют также суживающимися или простыми. Сопла, в выходном сечении которых скорость истечения превышает местную скорость звука, называются сверхзвуковыми (сопла Лавалья). Формы дозвукового и сверхзвукового сопел изображены на рисунке 4.1.



----- – согласно формулам (4.6), (4.7) и (4.8)

Рисунок 4.1 – Изменение сечения и распределение параметров потока по длине для дозвукового и сверхзвукового сопел

Математические зависимости, связывающие скорость потока, расход газа и площадь поперечного сечения сопла с параметрами состояния, устанавливаются путем совместного решения уравнения первого закона термодинамики; уравнения движения и уравнения неразрывности, при этом принимается, что газ идеальный, а процесс расширения газа является изоэнтропным ($dS = 0$).

С учетом сделанных допущений указанные уравнения для одномерного потока имеют вид:

$$d\left(\frac{w^2}{2}\right) = dh; \quad (4.2)$$

$$w dw = -v dp; \quad (4.3)$$

$$G = \rho w f = \text{const}; \quad (4.4)$$

$$\frac{df}{f} = (M^2 - 1) \frac{dw}{w}, \quad (4.5)$$

где w – скорость газа в произвольном сечении сопла, м/с;

h – энтальпия газа в том же сечении, кДж/кг;

f – площадь произвольного сечения сопла, м²;

$M = w/a$ – число Маха (число M).

Интегрируя уравнение (4.3) в пределах начального и произвольного сечения сопла и принимая скорость газа на входе $w_1 = 0$, получим

$$w = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (4.6)$$

Подставив в уравнение (4.4) значение скорости, найдем теоретический расход газа

$$G = \psi_i f \sqrt{p_1 / v_1}, \quad (4.7)$$

$$\text{где } \psi_i = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}; \quad (4.8)$$

p – давление в рассматриваемом сечении, Па.

Для течения с ускорением $dw > 0$, поэтому знак правой части уравнения (4.5) определяется числом M . Если $M < 1$, то $w < a$; $(M^2 - 1) < 0$ и $df < 0$, т.е. в дозвуковой области сечение канала сопла по направлению потока должно уменьшаться. При $M = 1$ (кризис истечения) $w = w_{кр} = a_{кр}$, $df = 0$, $f = f_{min}$. Дальнейшее повышение скорости - переход в сверхзвуковую область, когда $M > 1$, $w > a$, приводит к изменению знака в правой части уравнения (4.5), поэтому $df > 0$ и канал должен расширяться.

Из сказанного видно, что когда скорость потока становится равной местной скорости звука ($M = 1$), наступает кризис истечения, характеризующийся тем, что для дальнейшего увеличения скорости недостаточно увеличивать перепад давления, необходимо также изменить геометрию канала: увеличивать площадь сечения. Такой режим течения называется критическим, а параметры потока, которые устанавливаются в минимальном сечении сопла, называются критическими.

Отношение давлений $\beta_{кр} = p_{кр}/p_1$, при котором достигается скорость звука, называется критическим и определяется по формуле

$$\beta_{кр} = \frac{p_{кр}}{p_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (4.9)$$

Как видно, $\beta_{кр}$ зависит только от природы газа. Для двухатомных газов и воздуха $\beta_{кр} = 0,528$, для перегретого пара $\beta_{кр} = 0,546$, $k = 1,3$.

Подстановка $\beta_{кр}$ в формулы (4.6) и (4.8) дает

$$w_{кр} = a_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} p_1 v_1}; \quad (4.10)$$

$$G_{кр} = G_{max} = f_{min} B_k \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}, \quad (4.11)$$

где $w_{кр}$ – критическая скорость, численно равная критической скорости звука, м/с;

f_{min} – минимальное сечение сопла, м². Для суживающего сопла $f_{min} = f_2$; B_k – коэффициент, определяемый по формуле

$$B_k = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}}. \quad (4.12)$$

Для воздуха $B_k = 0,686$; для перегретого пара $B_k = 0,667$.

Из (4.11) видно, что при заданных размерах сопла максимальный расход зависит только от начальных параметров газа. В общем случае давление p_c на срезе сопла (в выходном сечении) и давление p_2 за соплом, которое принято называть противодавлением, не равны между собой. В зависимости от их соотношения различают следующие режимы работы суживающегося сопла:

1) докритический режим течения. В этом случае $\beta > \beta_{кр}$, $p_c = p_2$. Скорость $w_2 < w_{кр}$ и определяется по формуле (4.6). Расход газа $G < G_{max}$ находится по (4.7);

2) критический режим, когда $\beta = \beta_{кр}$ и $p_c = p_2 = p_{кр}$. Скорость $w_2 = w_{кр}$, расход $G = G_{max}$. Их значения находят по (4.10) и (4.11);

3) закритический режим течения. В этом случае $\beta < \beta_{кр}$, $p_2 < p_{кр}$. Скорость и расход газа определяют по (4.10) и (4.11). При этом режиме $p_c = p_{кр} = \text{const}$ независимо от величины давления p_2 , поэтому при заданных начальных параметрах скорость и другие параметры газа не меняются и равны критическим значениям. Расширение газа от давления p_c до давления p_2 происходит за соплом и сопровождается образованием волн разрежения и сжатия.

На рис. 4.1 изображены кривые изменения скорости, расхода и площади сечения сопла от отношения $\beta = p_2/p_1$, а также изменение параметров потока по длине сопла для рассмотренных выше режимов.

Процесс течения реального газа сопровождается потерей части кинетической энергии потока на преодоление трения газа о стенки канала и вихреобразования, т.е. является необратимым. В результате действительная скорость газа и действительный расход будут меньше значений, определяемых по формулам (4.6) и (4.7). Для оценки влияния потерь на скорость используется понятие коэффициента скорости ϕ , представляющего собой отношение действительной скорости истечения $w_{2д}$ к теоретической w_2

$$j = w_{2д} / w_2. \quad (4.13)$$

Отношение действительного расхода газа к теоретическому называется коэффициентом расхода μ_d . По определению

$$m_d = G_d / G, \quad (4.14)$$

где G_d - действительный расход газа; m_d - коэффициент расхода.

Очевидно, $\phi < 1$ и $\mu_d < 1$.

4.3 Экспериментальная установка

Для проведения опыта по измерению давления, температуры и расхода газа в лаборатории имеются две одинаковые по конструкции установки, размещенные на стендах ТД4-1 и ТД4-2. Схема установки изображена на рис. 4.2.

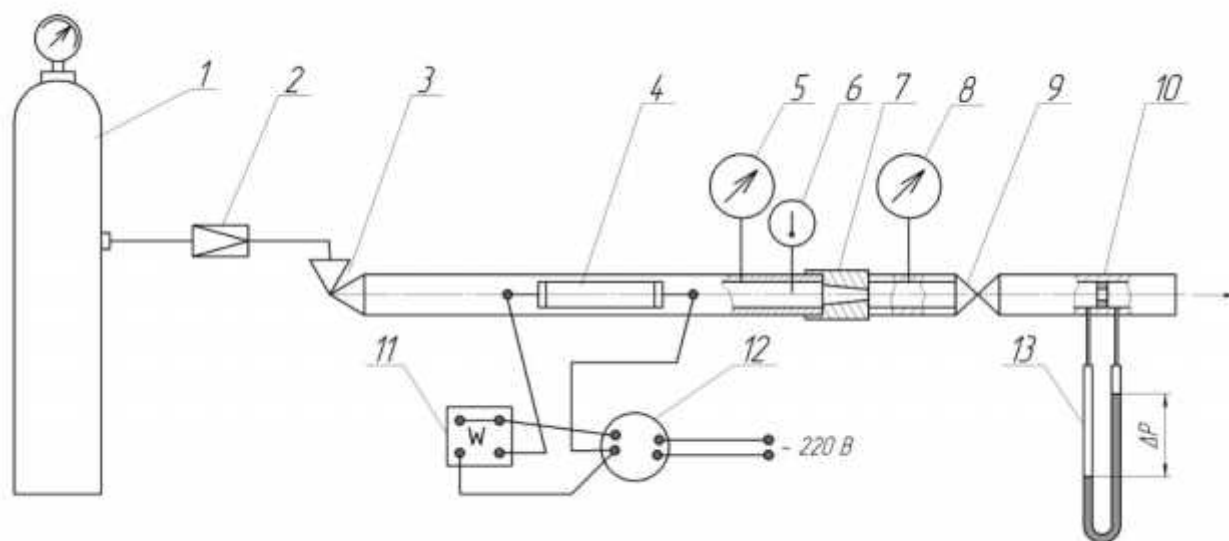


Рисунок 4.2 – Схема экспериментальной установки

1 – труба; 2 – редукционный клапан; 3, 9 – запорные клапаны; 4 – электронагреватель; 5 – сопло; 6 – термометр; 7, 8 – манометры; 10 – дроссельная диафрагма; 11 – дифманометр; 12 – ваттметр; 13 – автотрансформатор

Рабочим телом в установках служит сжатый подогретый воздух.

Установка состоит из трубы 1, соединенной через редукционный клапан 2

с баллонами со сжатым воздухом, запорных клапанов 3 и 9, электронагревателя 4, сопла 5, дроссельной диафрагмы 10, манометров 7 и 8, предназначенных для измерения давления воздуха перед и за соплом. Термометр 6 для измерения температуры воздуха находится перед соплом. Расход воздуха измеряется дроссельным устройством, состоящим из диафрагмы 10 и жидкостного дифманометра 11.

Мощность тока, подводимого к нагревателю 4, регулируется автотрансформатором 13, а ее величина устанавливается по ваттметру 12 на стенде ТД4-1 и по амперметру на стенде ТД4-2.

4.4 Подготовка и проведение опыта

Подготовка к опыту:

- изучить установку, назначение и расположение приборов;
- изучить инструкцию, имеющуюся на стенде;
- получить допуск к проведению опыта, а также вариант согласно таблице вариантов (таблица 4.1) и записать его в таблицу измерений (таблица 4.2), при этом задаваемые значения давления $p_{1м}$ должны соответствовать величинам, указанным на кривых, выражающих зависимость $G = f(p_1, \Delta p)$, где Δp - перепад давления в дроссельной диафрагме. Графики имеются на стендах;
- убедиться в наличии воды в дифманометре. Долив воды производит лаборант до начала занятий;
- определить по барометру и записать в таблицу 4.2 барометрическое давление.

Таблица 4.1

Вариант	Давление по манометрам 7 и 8, кгс/см ²							
	$p_{1м}$	$p_{2м}$						
1	2,0	0,6	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7
2	2,5	0,9	1,0	1,2	1,4	1,7	2,0	2,3
3	3,0	1,1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,7
4	3,5	1,4	1,6	1,9	2,2	2,5	2,9	3,3

Проведение опыта:

- включить нагреватель и при помощи автотрансформатора установить по ваттметру мощность 125...130 Вт (на стенде ТД4-1) или по амперметру силу тока $I = 1,3...1,5$ А (на ТД4-2);
- пустить компрессор и накачать в баллоны воздух до давления 10 кгс/см² по манометру, установленному на баллоне, если пуск производится со стенда ТД4-2, или по манометру с надписью «Давление в баллонах», если компрессор пускается со стенда ТД4-1. Пуск компрессора, а также включение приборов производится под наблюдением преподавателя по инструкции, имеющейся на стенде;
- плавным вращением рукоятки редукционного клапана 2 по часовой стрелке установить по манометру 7 давление $p_{1м} = 1...1,5$ кгс/см²;

- когда температура воздуха на входе в сопло достигнет 50...60 °С, установить заданное давление $p_{1м}$ и наименьшее по варианту давление $p_{2м}$ (прикрытием клапана 9). Записать в таблицу 4.2 показания манометров, термометра и дифманометра;

Таблица 4.2

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

Давление, кгс/см ²		Температура $t_1, ^\circ\text{C}$	Показания дифманометра, мм			Расход воздуха $10^3 G, \text{кг/с}$
$p_{1м}$	$p_{2м}$		Δp_1	Δp_2	Δp	

- дальнейшим прикрытием клапана 9 устанавливать следующие значения давления $p_{2м}$ и снимать показания указанных выше приборов;
- сняв показания приборов на всех режимах, определить перепады давления $\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2$ и соответствующие им расходы воздуха по графикам на стендах (цифры на графиках означают давление по манометру);
- заполненную таблицу измерений предъявить преподавателю на подпись. Привести установку в исходное положение.

4.5 Обработка результатов опыта

Обработка результатов опыта включает:

- определение скорости истечения, скорости звука при отношениях давлений $\beta = p_2/p_1$, замеренных в опыте;
- определение теоретической скорости, расхода воздуха, а также коэффициента скорости и коэффициента расхода при тех же значениях β ;
- построение графиков зависимости скорости истечения, скорости звука и расхода от отношения давлений β .

Расчеты рекомендуется оформлять по форме таблицы 4.3.

Таблица 4.3

Определяемая величина	Источник или формула	Числовое значение на режиме					
		1	2	3	4	5	6
Давление перед соплом $10^{-5} p_1, \text{Па}$	$p_{1м} + B$						
То же, за соплом $10^{-5} p_2, \text{Па}$	$p_{2м} + B$						
Отношение давлений β	p_2/p_1						
Температура $T_1, \text{К}$	$t_1 + 273,15$						
То же, $T_2, \text{К}$ ($\beta \geq \beta_{кр}$)	$\beta^{\frac{k-1}{k}} T_1$						
Удельный объем $v_1, \text{м}^3/\text{кг}$	RT_1/p_1						

Продолжение таблицы 4.3

Определяемая величина	Источник или формула	Числовое значение на режиме					
		1	2	3	4	5	6
То же, v_2 , м ³ /кг	$v_1(p_1/p_2)^{1/k}$						
Теоретическая скорость истечения w_2 , м/с	$\sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]}$						
При ($\beta \leq \beta_{кр}$) $w_{2кр}$	$\sqrt{2k / (k + 1) p_1 v_1}$						
Площадь сечения сопла, м ²	$f_c = \frac{\pi}{4} d_c^2$						
Действительный расход G_d , кг/с	Таблица измерений						
Теоретический расход воздуха G , кг/с	$\Psi_i f_c \sqrt{p_1 / v_1}$						
При ($\beta \leq \beta_{кр}$) $G_{кр}$	$B_k f_c \sqrt{p_1 / v_1}$						
Коэффициент расхода μ_d	G_d / G						
Действительная скорость истечения w_d , м/с	$G_d v_2 / f_2$						
Коэффициент скорости	$\phi = w_d / w_2$						
Скорость звука в выходном сечении сопла a_2 , м/с	$\sqrt{k p_2 v_2}$						
Примечание - При отношении $\beta \leq 0,528$ расчет скорости (п. 8) и расхода воздуха (п. 11) выполнять по формулам $w_2 = \sqrt{\frac{2k}{k+1} p_1 v_1}$, $G = f_c B_k \sqrt{p_1 / v_1}$, где $B_k = 0,686$.							

4.6 Контрольные вопросы для самоподготовки

На допуск к работе:

1. Дать наименование и указать цель и содержание работы.
2. Рассказать устройство экспериментальной установки и порядок проведения опыта.
3. Объяснить назначение приборов, используемых в опыте.
4. Какие величины измеряются в процессе опыта и зачем?
5. Как определить разность уровней в дифманометре? Для какой цели определяется эта разность?
6. мм рт. ст. выразить в кгс/см² и паскалях.
7. кгс/см² выразить в паскалях и мегапаскалях.
8. Как в опыте определяется расход воздуха?
9. Как определить цену деления ваттметра?
10. Рассказать последовательность выполнения опыта.

К защите работы:

11. Дать определение «изоэнтропный процесс». Изобразить процесс на h , S и T , S диаграммах.
12. Имеются ли различия между адиабатным и изоэнтропным процессами и какие?
13. Что такое сопло? Дать классификацию сопел.
14. Что такое критические параметры потока газа?
15. Изобразить кривые зависимости скорости истечения и скорости звука от отношения давлений β .
16. Чему равна критическая скорость потока? Как влияют начальные параметры газа на величину этой скорости?
17. Когда давление на срезе сопла равно давлению за соплом?
18. Какую наибольшую скорость газа можно получить при истечении его из дозвукового сопла?
19. Изобразить сверхзвуковое сопло и сверхзвуковой диффузор и показать сечение, в котором устанавливаются критические параметры потока. Чем отличается диффузор от сопла?
20. При каких значениях β достигается максимальная скорость и максимальный расход газа при истечении его из сопел Лаваля?
21. Изобразить кривую изменения расхода газа через сопло от отношения $\beta = p_2/p_1$, а также по длине сопла.
22. Что такое температура торможения? Какая температура измеряется термометром 6 на рис. 4.2?
23. Что выражает уравнение $d\left(\frac{w}{2}\right) = -vdp$? Для какого процесса оно справедливо?
24. Что такое техническая работа? Показать на p , v диаграмме площадь, соответствующую этой работе.
25. Расход газа 2,2 кг/с. Определить количество газа, прошедшего через сопло за 30 мин.
26. Определить расход через сопло, если из него в течение 1 ч 20 мин вытекло 3600 кг газа.
27. Что выражает уравнение $q = \Delta h + \Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + l_{\text{тех}}$? Преобразовать его для изоэнтропного процесса.
28. Почему сверхзвуковое сопло имеет расширяющийся канал, а дозвуковое - сужающийся?
29. Изобразить кривую изменения площади сечения сопла Лаваля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Луканин В.Н. Теплотехника: Учеб. для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер. — М.: Высш. шк., 2000. — 671 с.
2. Кудинов В.А. Техническая термодинамика. Учеб. пособие для втузов / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов. — М.: Высш. шк., 2001. — 261 с.
3. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике / О.М. Рабинович. — М.: Машиностроение, 1973. — 344 с.
4. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. — М.: Высшая школа, 1980. — 273 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Молекулярные массы, плотности и объемы киломолей при нормальных условиях и газовые постоянные важнейших газов

Вещество	Химическое обозначение	Молекуляр- ная масса μ , кг/кмоль	Плотность ρ , кг/м ³	Объем ки- ломоля ν , м ³ /кг	Газовая постоянная, Дж/(кг·град)
Воздух	-	28,96	1,293	22,40	287,0
Кислород	O ₂	32,00	1,429	22,39	259,8
Азот	N ₂	28,026	1,251	22,40	296,8
Атмосферный азот ¹	N ₂	28,16	(1,257)	(22,40)	(295,3)
Гелий	He	4,003	0,179	22,42	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	22,39	208,2
Водород	H ₂	2,016	0,090	22,43	4124,01
Окись углерода	CO	28,01	1,250	22,40	296,8
Двуокись углерода	CO ₂	44,01	1,977	22,26	188,9
Сернистый газ	SO ₂	64,06	2,926	21,89	129,8
Метан	CH ₄	16,032	0,717	22,39	518,8
Этилен	C ₂ H ₄	28,052	1,251	22,41	296,6
Коксовый газ	-	11,50	0,515	22,33	721,0
Аммиак	NH ₃	17,032	0,771	22,08	488,3
Водяной пар ²	H ₂ O	18,016	(0,804)	(22,40)	(461)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара

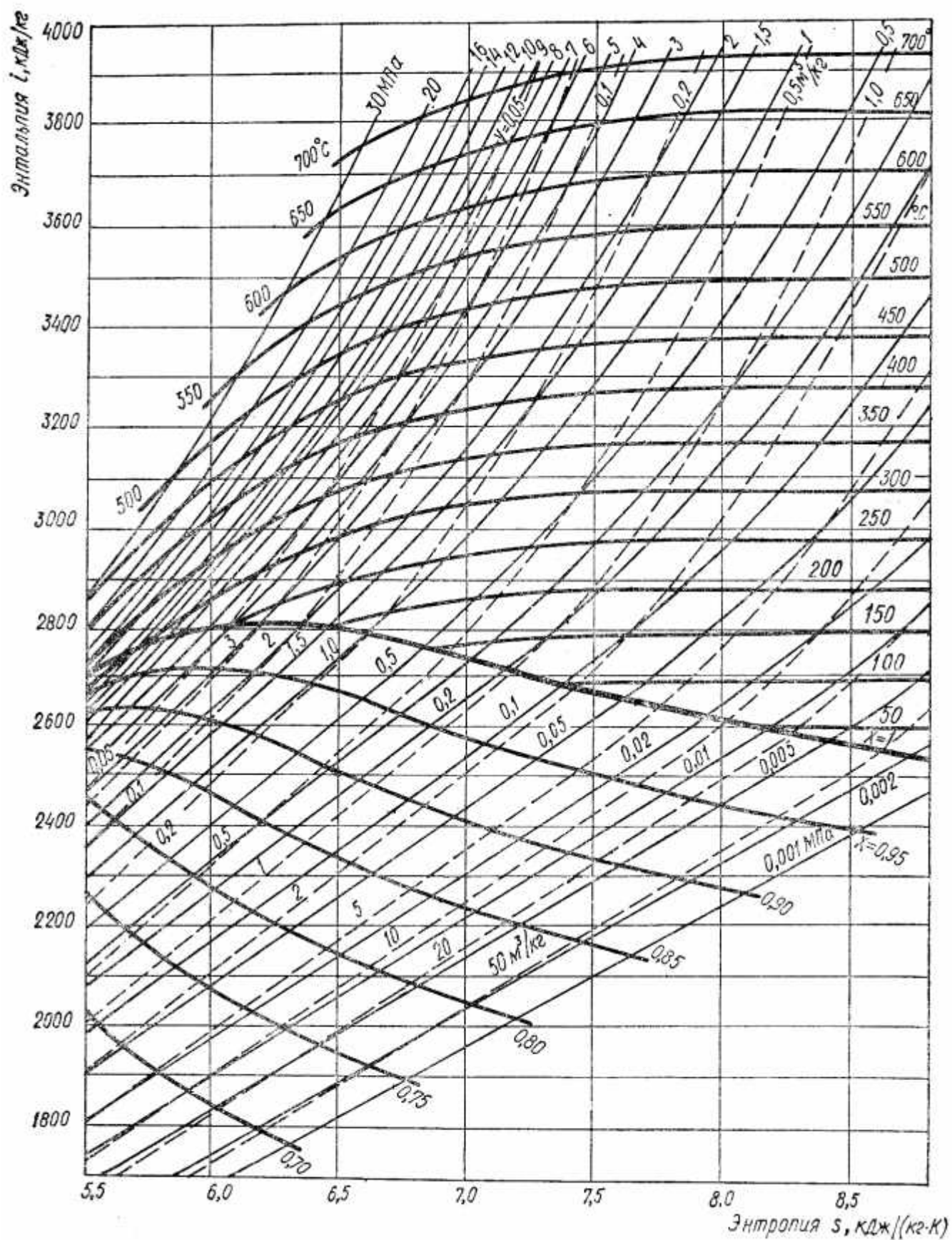
t , °C	T , К	p , кПа	$v' \cdot 10^3$, $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	v'' , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	h' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	h'' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	r , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	s' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	s'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s'$, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
0,00	273,15	0,6108	1,0002	206,321	-0,04	2501,0	2501,0	-0,0002	9,1565	9,1567
0,01	283,16	0,6112	1,00022	206,175	0,000614	2501,0	2501,0	0,0000	9,1562	9,1562
1,0	274,15	0,6566	1,0001	192,611	4,17	2502,8	2498,6	0,0152	9,1298	9,1146
2,0	275,15	0,7054	1,0001	179,935	8,39	2504,7	2496,3	0,0306	9,1035	9,0729
3,0	276,15	0,7575	1,0000	168,165	12,60	2506,5	2493,9	0,0459	9,0773	9,0314
4,0	277,15	0,8129	1,0000	157,267	16,80	2508,3	2491,5	0,0611	9,0514	8,9903
5,0	278,15	0,8718	1,0000	147,167	21,01	2510,2	2489,2	0,0762	9,0258	8,9496
6,0	279,15	0,9346	1,0000	137,768	25,21	2512,0	2486,8	0,0913	9,0003	8,9090
7,0	280,15	1,0012	1,0001	129,061	29,41	2513,9	2484,5	0,1063	8,9751	8,8688
8,0	281,15	1,0721	1,0001	120,952	33,60	2515,7	2482,1	0,1213	8,9501	8,8288
9,0	282,15	1,1473	1,0002	113,423	37,80	2517,5	2479,7	0,1362	8,9254	8,7892
10,0	283,15	1,2271	1,0003	106,419	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9009	8,7499
11,0	284,15	1,3118	1,0003	99,896	46,19	2521,2	2475,0	0,1658	8,8766	8,7108
12,0	285,15	1,4015	1,0004	93,828	50,38	2523,0	2472,6	0,1805	8,8525	8,6720
13,0	286,15	1,4967	1,0006	88,165	54,57	2524,9	2470,2	0,1952	8,8286	8,6334
14,0	287,15	1,5974	1,0007	82,893	58,75	2526,7	2467,9	0,2098	8,8050	8,5952
15,0	288,15	1,7041	1,0008	77,970	62,94	2528,6	2465,7	0,2243	8,7815	8,5572
15,5	288,65	1,7598	1,0009	75,632	65,03	2529,5	2464,5	0,2316	8,7699	8,5383
16,0	289,15	1,8170	1,0010	73,376	67,13	2530,4	2463,3	0,2388	8,7583	8,5195
16,5	289,65	1,8759	1,0011	71,194	69,22	2531,3	2462,1	0,2460	8,7468	8,5008
17,0	290,15	1,9364	1,0012	69,087	71,31	2532,2	2460,9	0,2533	8,7353	8,4820
17,5	290,65	1,9986	1,0012	67,051	73,40	2533,1	2459,7	0,2605	8,7239	8,4634
18,0	291,15	2,0626	1,0013	65,080	75,50	2534,0	2458,5	0,2677	8,7125	8,4448
18,5	291,65	2,1284	1,0014	63,175	77,59	2535,0	2457,4	0,2748	8,7011	8,4263
19,0	292,15	2,1960	1,0015	61,334	79,68	2535,9	2456,2	0,2820	8,6898	8,4078
19,5	292,65	2,2654	1,0016	59,556	81,77	2536,8	2455,0	0,2892	8,6786	8,3894
20,0	293,15	2,3368	1,0017	57,833	83,86	2537,7	2453,8	0,2963	8,6674	8,3711
20,5	293,65	2,4102	1,0018	56,166	85,95	2538,6	2452,6	0,3034	8,6563	8,3529
21,0	294,15	2,4855	1,0019	54,556	88,04	2539,5	2451,5	0,3105	8,6452	8,3347
21,5	294,65	2,5629	1,0020	52,997	90,13	2540,4	2450,3	0,3176	8,6342	8,3166
22,0	295,15	2,6424	1,0022	51,488	92,22	2541,4	2449,2	0,3247	8,6232	8,2985
22,5	295,65	2,7241	1,0023	50,027	94,32	2542,3	2448,0	0,3318	8,6123	8,2805
23,0	296,15	2,8079	1,0024	48,615	96,41	2543,2	2446,8	0,3389	8,6014	8,2625
23,5	296,65	2,8940	1,0025	47,247	98,50	2544,1	2445,6	0,3459	8,5905	8,2446
24,0	297,15	2,9824	1,0026	45,923	100,59	2545,0	2444,4	0,3530	8,5797	8,2267

t , °C	T , K	p , кПа	$\nu' \cdot 10^3$, $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	ν'' , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	h' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	h'' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	r , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	s' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	s'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s'$, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
24,5	297,65	3,0731	1,0028	44,641	102,68	2545,9	2443,2	0,3600	8,5690	8,2090
25,0	298,15	3,1663	1,0029	43,399	104,77	2546,8	2442,0	0,3670	8,5583	8,1913
25,5	298,65	3,2619	1,0030	42,196	106,86	2547,7	2440,8	0,3740	8,5476	8,1736
26,0	299,15	3,3600	1,0032	41,031	108,95	2548,6	2439,6	0,3810	8,5370	8,1560
26,5	299,65	3,4606	1,0033	39,904	111,64	2549,5	2438,5	0,3880	8,5264	8,1384
27,0	300,15	3,5639	1,0034	38,811	113,13	2550,4	2437,3	0,3949	8,5159	8,1210
27,5	300,65	3,6698	1,0036	37,752	115,22	2551,4	2436,2	0,4019	8,5054	8,1035
28,0	301,15	3,7785	1,0037	36,726	117,31	2552,3	2435,0	0,4088	8,4950	8,0862
28,5	301,65	3,8900	1,0039	35,732	119,40	2553,2	2433,8	0,4158	8,4846	8,0688
29,0	302,15	4,0043	1,0040	34,768	121,48	2554,1	2432,6	0,4227	8,4743	8,0516
29,5	302,65	4,1215	1,0042	33,834	123,57	2555,0	2431,4	0,4296	8,4640	8,0344
30,0	303,15	4,2417	1,0043	32,929	125,66	2555,9	2430,2	0,4365	8,4537	8,0172
30,5	303,65	4,3650	1,0045	32,050	127,75	2556,8	2429,0	0,4434	8,4435	8,0001
31,0	304,15	4,4913	1,0046	31,199	129,84	2557,7	2427,9	0,4503	8,4334	7,9831
31,5	304,65	4,6208	1,0048	30,373	131,93	2558,6	2426,7	0,4571	8,4233	7,9662
32,0	305,15	4,7536	1,0049	29,572	134,02	2559,5	2425,5	0,4640	8,4132	7,9492
32,5	305,65	4,8896	1,0051	28,796	136,11	2560,4	2424,3	0,4708	8,4031	7,9323
33,0	306,15	5,0290	1,0053	28,042	138,20	2561,4	2423,2	0,4777	8,3932	7,9155
33,5	306,65	5,1718	1,0054	27,312	140,29	2562,3	2422,0	0,4845	8,3832	7,8987
34,0	307,15	5,3182	1,0056	26,602	142,38	2563,2	2420,8	0,4913	8,3733	7,8820
34,5	307,65	5,4681	1,0058	25,914	144,47	2564,1	2419,6	0,4981	8,3634	7,8653
35,0	308,15	5,6217	1,0060	25,246	146,56	2565,0	2418,4	0,5049	8,3536	7,8487
36,0	309,15	5,9401	1,0063	23,968	150,74	2566,8	2416,1	0,5184	8,3341	7,8157
37,0	310,15	6,2740	1,0067	22,764	154,92	2568,6	2413,7	0,5319	8,3147	7,7828
38,0	311,15	6,6240	1,0070	21,629	159,09	2570,4	2411,3	0,5453	8,2955	7,7502
39,0	312,15	6,9907	1,0074	20,558	163,27	2572,2	2408,9	0,5588	8,2765	7,7177
40	313,15	7,3749	1,0078	19,548	167,45	2574,0	2406,5	0,5721	8,2576	7,6855
41	314,15	7,7772	1,0082	18,594	171,63	2575,8	2404,2	0,5854	8,2389	7,6535
42	315,15	8,1983	1,0086	17,694	175,81	2577,6	2401,8	0,5987	8,2203	7,6216
43	316,15	8,6390	1,0090	16,843	179,99	2579,4	2399,4	0,6120	8,2019	7,5899
44	317,15	9,0998	1,0094	16,039	184,17	2581,1	2396,9	0,6252	8,1836	7,5584
45	318,15	9,5817	1,0099	15,278	188,35	2582,9	2394,5	0,6383	8,1655	7,5272
46	319,15	10,0854	1,0103	14,559	192,53	2584,7	2392,2	0,6514	8,1475	7,4961
47	320,15	10,612	1,0107	13,879	196,71	2586,5	2389,8	0,6645	8,1297	7,4652
48	321,15	11,161	1,0112	13,236	200,89	2588,3	2387,4	0,6776	8,1121	7,4345
49	322,15	11,735	1,0116	12,626	205,07	2590,1	2385,0	0,6906	8,0945	7,4039

t , °C	T , K	p , кПа	$v' \cdot 10^3$, $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	v'' , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	h' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	h'' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	r , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	s' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	s'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s'$, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
50	323,15	12,335	1,0121	12,048	209,26	2591,8	2382,5	0,7035	8,0771	7,3736
51	324,15	12,960	1,0126	11,501	213,44	2593,6	2380,2	0,7164	8,0598	7,3434
52	325,15	13,612	1,0131	10,982	217,62	2595,4	2377,8	0,7293	8,0427	7,3133
53	326,15	14,292	1,0136	10,490	221,80	2597,2	2375,4	0,7422	8,0258	7,2836
54	327,15	15,001	1,0140	10,024	225,98	2598,9	2372,9	0,7550	8,0089	7,2539
55	328,15	15,740	1,0145	9,5812	230,17	2600,7	2370,5	0,7677	7,9922	7,2245
56	329,15	16,510	1,0150	9,1609	234,35	2602,4	2368,1	0,7804	7,9756	7,1952
57	330,15	17,312	1,0156	8,7618	238,54	2604,2	2365,7	0,7931	7,9591	7,1660
58	331,15	18,146	1,0161	8,3831	242,72	2606,0	2363,3	0,8058	7,9428	7,1370
59	332,15	19,015	1,0166	8,0229	246,91	2607,7	2360,8	0,8184	7,9266	7,1082
60	333,15	19,919	1,0171	7,6807	251,09	2609,5	2358,4	0,8310	7,9106	7,0796
61	334,15	20,859	1,0177	7,3554	255,28	2611,2	2355,9	0,8435	7,8946	7,0511
62	335,15	21,837	1,0182	7,0458	259,46	2613,0	2353,5	0,8560	7,8788	7,0228
63	336,15	22,854	1,0188	6,7512	263,65	2614,7	2351,1	0,8685	7,8631	6,9946
64	337,15	23,910	1,0193	6,4711	267,84	2616,4	2348,6	0,8809	7,8475	6,9666
65	338,15	25,008	1,0199	6,2042	272,02	2618,2	2346,2	0,8933	7,8320	6,9387
66	339,15	26,148	1,0205	5,9502	276,21	2619,9	2343,7	0,9057	7,8167	6,9110
67	340,15	27,332	1,0211	5,7082	280,40	2621,6	2341,2	0,9180	7,8015	6,8835
68	341,15	28,561	1,0217	5,4775	284,59	2623,3	2338,7	0,9303	7,7864	6,8561
69	342,15	29,837	1,0222	5,2576	288,78	2625,1	2336,3	0,9426	7,7714	6,8288
70	343,15	31,161	1,0228	5,0479	292,97	2626,8	2333,8	0,9548	7,7565	6,8017
71	344,15	32,533	1,0235	4,8481	297,16	2628,5	2331,3	0,9670	7,7417	6,7747
72	345,15	33,957	1,0241	4,6574	301,36	2630,2	2328,8	0,9792	7,7270	6,7478
73	346,15	35,433	1,0247	4,4753	305,55	2631,9	2326,3	0,9913	7,7125	6,7212
74	347,15	36,963	1,0253	4,3015	309,74	2633,6	2323,9	1,0034	7,6980	6,6946
75	348,15	38,548	1,0259	4,1356	313,94	2635,3	2321,4	1,0154	7,6837	6,6683
76	349,15	40,190	1,0266	3,9771	318,13	2637,0	2318,9	1,0275	7,6694	6,6419
77	350,15	41,890	1,0272	3,8257	322,33	2638,7	2316,4	1,0395	7,6553	6,6158
78	351,15	43,650	1,0279	3,6811	326,52	2640,4	2313,9	1,0514	7,6413	6,5899
79	352,15	45,473	1,0285	3,5427	330,72	2642,1	2311,4	1,0634	7,6274	6,5640
80	353,15	47,359	1,0292	3,4104	334,92	2643,8	2308,9	1,0752	7,6135	6,5383
81	354,15	49,310	1,0299	3,2839	339,11	2645,4	2306,3	1,0871	7,5998	6,5127
82	355,15	51,328	1,0305	3,1629	343,31	2647,1	2303,8	1,0990	7,5862	6,4872
83	356,15	53,415	1,0312	3,0471	347,51	2648,8	2301,3	1,1108	7,5726	6,4618
84	357,15	55,572	1,0319	2,9362	351,71	2650,4	2298,7	1,1225	7,5592	6,4367

t , °C	T , K	p , кПа	$\nu \cdot 10^3$, $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	ν'' , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	h' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	h'' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	r , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	s' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	s'' , $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$	$s'' - s'$, $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$
85	358,15	57,803	1,0326	2,8300	355,92	2652,1	2296,2	1,1343	7,5459	6,4116
86	359,15	60,107	1,0333	2,7284	360,12	2653,7	2293,6	1,1460	7,5326	6,3866
87	360,15	62,488	1,0340	2,6309	364,32	2655,4	2291,1	1,1577	7,5195	6,3618
88	361,15	64,947	1,0347	2,5376	368,53	2657,0	2288,5	1,1693	7,5064	6,3371
89	362,15	67,486	1,0354	2,4482	372,73	2658,7	2286,0	1,1809	7,4934	6,3125
90	363,15	70,108	1,0361	2,3624	376,94	2660,3	2283,4	1,1925	7,4805	6,2880
91	364,15	72,814	1,0369	2,2801	381,15	2661,9	2280,7	1,2041	7,4677	6,2636
92	365,15	75,607	1,0376	2,2012	385,36	2663,5	2278,1	1,2156	7,4550	6,2394
93	366,15	78,488	1,0384	2,1256	389,57	2665,2	2275,6	1,2271	7,4424	6,2153
94	367,15	81,460	1,0391	2,0529	393,78	2666,8	2273,0	1,2386	7,4299	6,1913
95	368,15	84,525	1,0398	1,9832	397,99	2668,4	2270,4	1,2500	7,4174	6,1674
96	369,15	87,685	1,0406	1,9163	402,20	2670,0	2267,8	1,2615	7,4051	6,1436
97	370,15	90,943	1,0414	1,8520	406,42	2671,6	2265,2	1,2729	7,3928	6,1199
98	371,15	94,301	1,0421	1,7902	410,63	2673,2	2262,6	1,2842	7,3806	6,0964
99	372,15	97,760	1,0429	1,7309	414,85	2674,8	2259,9	1,2956	7,3685	6,0729
100	373,15	101,325	1,0437	1,6738	419,06	2676,3	2257,2	1,3069	7,3564	6,0495

ПРИЛОЖЕНИЕ В **I-S - диаграмма для водяного пара**



ПРИЛОЖЕНИЕ Д
Пример оформления титульного листа отчета

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Севастопольский государственный университет»**

**Морской институт
Кафедра энергоустановок морских судов и сооружений**

ОТЧЕТ
по лабораторной работе № 1
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЁМКОСТИ ВОЗДУХА
по дисциплине
«Техническая термодинамика и теплопередача»
(часть 1 – техническая термодинамика)

Выполнил студент группы _____

Проверил _____

Севастополь
2019

**Тимофеев В. А.
Владецкий О.В.**

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА
И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

*Методические указания
к выполнению лабораторных работ по дисциплине*

Издается в авторской редакции

Изд. № 29/19. Объем 2,75 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»