

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

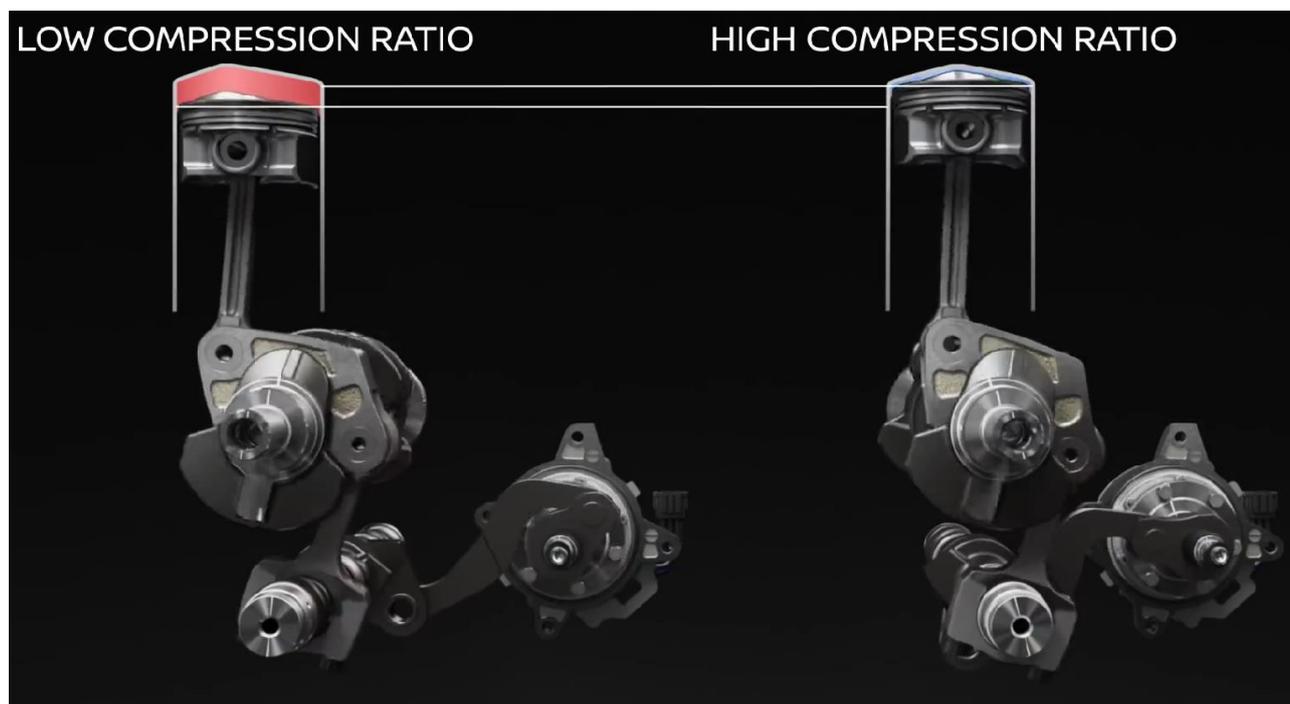
Михайличенко С.М., Купреенко А.И., Исаев Х.М.

Т Е П Л О Т Е Х Н И К А

Курс лекций

Часть I – ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Учебно-методическое пособие



Брянская область 2022

УДК 621.1 (07)

ББК 31.3

М 69

Михайличенко, С. М. Теплотехника. Курс лекций. Ч. I. Техническая термодинамика: учебно-методическое пособие по дисциплине «Теплотехника» для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 35.03.06 Агроинженерия / С. М. Михайличенко, А. И. Купреенко, Х. М. Исаев. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2022. – 58 с.

Учебно-методическое пособие содержит курс лекций, посвященных изучению раздела теплотехники «Техническая термодинамика». Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 35.03.06 Агроинженерия, профили Технические системы в агробизнесе, Технологическое оборудование для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Электрооборудование и электротехнологии, Технический сервис в АПК.

Рецензент:

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

Рекомендовано к изданию методической комиссии инженерно-технологического института от 30 июня 2022 г., протокол №9.

© Брянский ГАУ, 2022

© Михайличенко С.М., 2022

© Купреенко А.И., 2022

© Исаев Х.М., 2022

Оглавление

Предисловие	6
РАЗДЕЛ I. ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ.....	7
ЛЕКЦИЯ 1 – ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ.....	7
1.1. Введение.....	7
1.2. Общие сведения о теплоте	8
1.3. Основные параметры состояния газов.....	9
1.4. Уравнение состояния идеальных газов.....	12
ЛЕКЦИЯ 2 – СМЕСИ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ. ТЕПЛОЕМКОСТЬ.....	14
2.1. Смеси идеальных газов.....	14
2.2. Теплоемкость идеальных газов.....	17
ЛЕКЦИЯ 3 – ФУНКЦИИ СОСТОЯНИЯ. ТЕПЛОТА. РАБОТА. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ	19
3.1. Функции состояния. Понятие теплоты	19
3.2. Общие сведения о термодинамических процессах	21
3.3. Первый закон термодинамики. Понятие работы	21
ЛЕКЦИЯ 4 – ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ	23
4.1. Анализ основных термодинамических процессов	23
4.2. Изохорный процесс.....	24
4.3. Изобарный процесс	25
4.4. Изотермический процесс.....	26
4.5. Адиабатный процесс.....	27
4.6. Политропный процесс	28
ЛЕКЦИЯ 5 – КРУГОВЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.....	30
5.1. Общие сведения.....	30
5.2. Прямой обратимый цикл Карно	32
5.3. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС).....	34
ЛЕКЦИЯ 6 – ВОДЯНОЙ ПАР	34

6.1. Общие сведения.....	34
6.2. Фазовые переходы.....	36
6.3. Определение параметров состояния водяного пара	40
6.4. Исследование процесса парообразования с помощью i - s диаграммы	42
ЛЕКЦИЯ 7 – ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ.....	45
7.1. Общие сведения.....	45
7.2. Основные характеристики влажного воздуха	46
7.3. Применение таблиц для водяного пара в исследованиях влажного воздуха.....	48
ЛЕКЦИЯ 8 – ХОЛОДИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ.....	53
8.1. Общие сведения.....	53
8.2. Принципиальная схема и принцип работы паровой компрессорной холодильной установки	54
8.3. Тепловой насос	56

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

ОПК-1: Способен решать типовые задачи профессиональной деятельности на основе знаний основных законов математических и естественных наук с применением информационно-коммуникационных технологий.

Материалы, изложенные в данном учебно-методическом пособии, будут способствовать формированию указанных компетенций в результате освоения дисциплины «Теплотехника».

Предисловие

Данное учебно-методическое пособие предназначено для проведения лекционных занятий по дисциплине «Теплотехника» со студентами очной и заочной форм обучения направления подготовки 35.03.06 Агроинженерия, профили Технические системы в агробизнесе, Технологическое оборудование для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Электрооборудование и электротехнологии, Технический сервис в АПК.

Пособие включает в себя курс лекций, посвященных изучению раздела теплотехники «Техническая термодинамика». Рассмотрены следующие темы: «Общие понятия и определения. Параметры состояния. Уравнение состояния», «Смеси идеальных газов. Теплоемкость», «Функции состояния. Теплота. Работа. Первый закон термодинамики», «Термодинамические процессы изменения состояния идеальных газов», «Круговые термодинамические процессы», «Водяной пар», «Влажный воздух», «Холодильные установки».

РАЗДЕЛ I. ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

ЛЕКЦИЯ 1 – ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ

1.1. Введение

Теплотехника – наука, которая изучает методы получения, преобразования, передачи и использования теплоты, а также принципы действия и конструктивные особенности тепло- и парогенераторов, тепловых машин, аппаратов и устройств.

Теоретические основы теплотехники необходимы для установления наиболее рациональных способов использования теплоты, анализа экономических рабочих процессов тепловых установок, умелого комбинирования этих процессов и создания новых более совершенных типов тепловых агрегатов.

Можно выделить два принципиально различных направления использования теплоты – энергетическое и технологическое.

Теоретическими разделами теплотехники, в которых исследуются законы превращения и свойства тепловой энергии и процессы распространения теплоты, являются **техническая термодинамика** и **теория теплообмена**.

Термодинамика – наука об энергии и ее свойствах. Ее основой служат два экспериментально установленных закона (первое и второе начала термодинамики). Термодинамика разделяется на физическую (общую), химическую и техническую.

Техническая термодинамика изучает применение законов термодинамики к процессам взаимного превращения теплоты и механической работы.

1.2. Общие сведения о теплоте

Теплота – это вид энергии, которая проявляется в тепловом (хаотическом) движении микрочастиц вещества. Потенциалом теплоты как вида энергии является температура. Теплотой обладает любое тело, температура которого выше 0 градусов Кельвина ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$). При данной температуре полностью прекращается тепловое движение молекул.

Теплота может преобразовываться в другие виды энергии (механическую, электрическую и др.) либо передаваться другим телам или средам теплопроводностью, конвекцией, излучением.

Процесс преобразования теплоты в работу осуществляется в тепловых двигателях с помощью рабочего тела за счет изменения его состояния. Обычно в качестве рабочего тела используются газы и пары, т.к. они обладают большим коэффициентом теплового расширения и могут при нагревании совершать гораздо большую работу, чем жидкости и твердые тела.

Совокупность находящихся во взаимодействии тел, к которым относятся рабочее тело и источники (поглотители) теплоты, называется **термодинамической системой**.

При теоретическом изучении газообразных веществ принято иметь дело с так называемым **идеальным газом**, между молекулами которого отсутствуют силы взаимодействия, а сами молекулы принимаются за материальные точки, имеющие массу, но не имеющие объема. В теплотехнических расчетах при сравнительно невысоких давлениях и не слишком низких температурах допустимо считать идеальными все газы (воздух, азот, кислород, водород и т.д.), за исключением водяного пара, который является рабочим телом в паровых установках или теплоносителем в различных теплообменных аппаратах. В этом случае имеем дело с реальным газом, который не подчиняется законам идеальных газов.

1.3. Основные параметры состояния газов

Состояние газа отражают средние величины, характеризующие результат действия молекул, образующих газ. Они носят название *параметров состояния* газа. К основным параметрам состояния относятся термодинамическая температура, абсолютное давление и удельный объем (или плотность).

Температура характеризует степень нагретости тела или его тепловое состояние, проявляемое интенсивностью теплового движения микрочастиц. На практике температуру обычно измеряют по международной практической шкале (t , °C). Параметром состояния является *термодинамическая температура* T (К). Для перевода значений температуры из одной шкалы в другую пользуются формулой:

$$T = t + 273,15, \text{ К} \quad \text{или} \quad t = T - 273,15, \text{ }^\circ\text{C} .$$

Температуру измеряют с помощью термометров расширения (жидкостные, дилатометрические и биметаллические термометры), манометрических, электрических термометров (термометры сопротивления и термоэлектрические термометры – термопары), оптических и фотоэлектрических пирометров излучения и других приборов.

Давление p ($\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$) представляет собой силу F (Н), действующую на единицу площади поверхности S (м^2) и направленную перпендикулярно к этой поверхности. Параметром состояния является *абсолютное давление* $p_{\text{абс}}$, т.е. давление, отсчитанное от нуля.

На практике помимо паскалей также пользуются единицами измерения, которые приведены в таблице 1.1. Пользуясь данными зависимостями, можно переводить одни единицы измерения в другие.

Таблица 1.1 – Основные единицы измерения давления

Название	Обозначение	Размерность	Значение в Па
паскаль	Па	Н/м ²	1
килопаскаль	кПа	кН/м ²	10 ³
мегапаскаль	МПа	МН/м ²	10 ⁶
бар	бар	0,1 МН/м ²	10 ⁵
* килограмм-сила на квадратный метр	кгс/м ²	9,81 Н/м ²	9,80665
миллиметр водного столба	мм вод. ст.	мм	9,80665
метр водного столба	м вод. ст.	м	9806,65
миллиметр ртутного столба	мм рт.ст.	мм	133,322
техническая атмосфера	ат	кгс/см ²	98066,5
физическая атмосфера	атм	760 мм рт.ст.	101325
фунт-сила на квадратный дюйм	psi (lbs)	lbf/in ²	6894,76

* Под килограммом-силы понимают силу, которая сообщает покоящейся массе в 1 килограмм ускорение, равное нормальному ускорению свободного падения (9,80665 м/с²). Иными словами – это сила (вес), с которой объект массой в 1 кг действует на поверхность, т.е. $1 \text{ кгс} = mg = 1 \text{ кг} \cdot 9,80665 \text{ м/с}^2 = 9,80665 \text{ Н}$.

Помимо абсолютного давления различают *атмосферное, избыточное и вакуумметрическое* давление (рис. 1.1).

Атмосферное (барометрическое) давление B измеряется приборами, которые называются барометрами, и обычно указывается в миллиметрах ртутного столба (мм рт.ст.).

Приборы для измерения давления выше атмосферного называют манометрами. Они указывают величину избыточного (манометрического) давления $p_{\text{изб}}$ по отношению к атмосферному, т.е. по их показаниям судят о том, на сколько действующее давление превышает атмосферное. При вычислении абсолютного давления по показаниям манометра пользуются формулой:

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

где $p_{\text{изб}}$ – избыточное давление по показаниям манометра, Па.

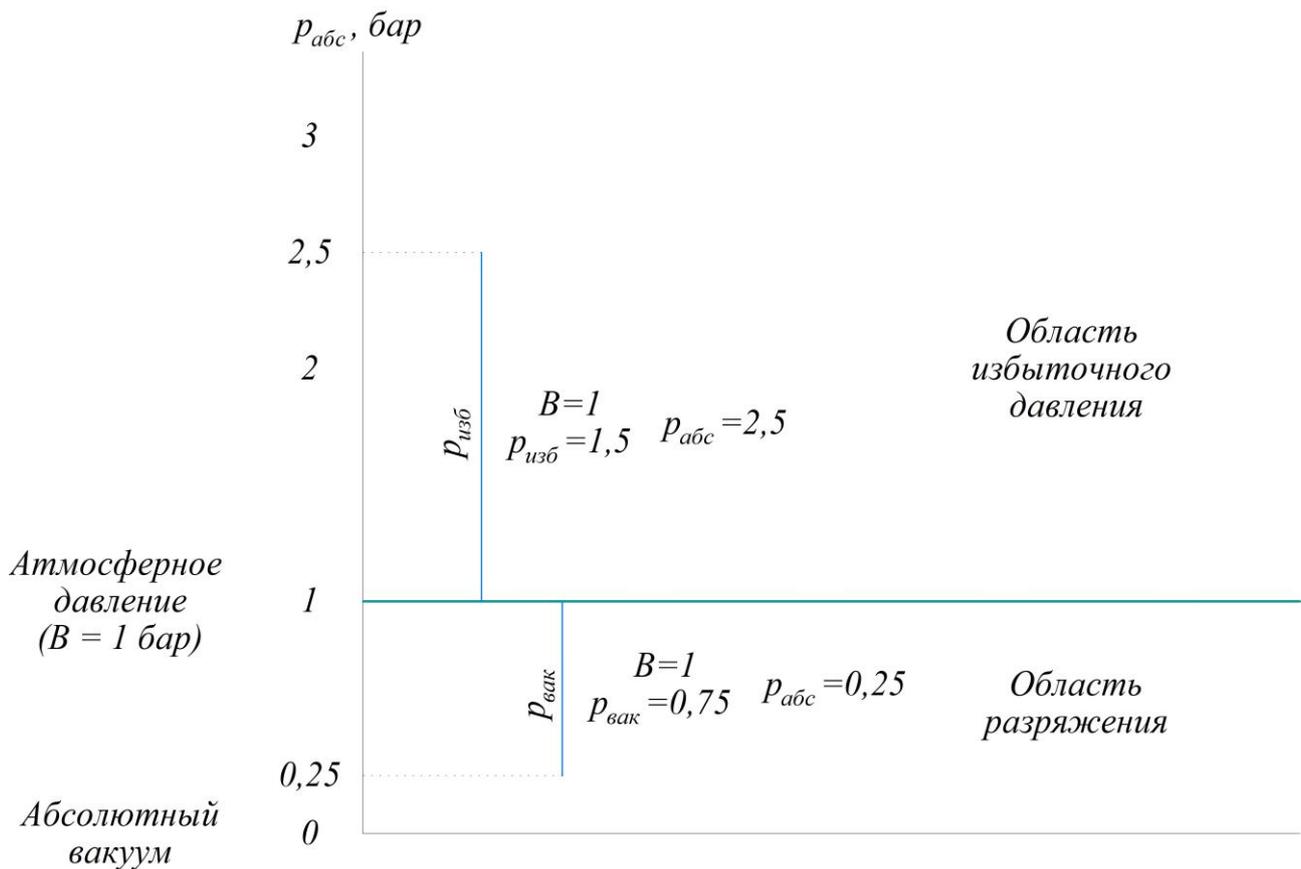


Рисунок 1.1 – К определению абсолютного давления

Давление ниже атмосферного называют разрежением. Приборы для измерения давления ниже атмосферного называют вакуумметрами. Они указывают величину разрежения – недостаток давления по отношению к атмосферному, т.е. по их показаниям судят о том, на сколько действующее давление меньше атмосферного. При вычислении абсолютного давления по показаниям вакуумметра пользуются формулой:

$$p_{абс} = B - p_{вак} ,$$

где $p_{вак}$ – вакуумметрическое давление по показаниям вакуумметра, Па.

Величина избыточного (вакуумметрического) давления по показаниям жидкостного манометра (вакуумметра) может быть найдена по формуле:

$$p_{изб} (p_{вак}) = \rho g \Delta h ,$$

где

ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

Δh – разность высот столбов жидкости, м.

1.4. Уравнение состояния идеальных газов

Для системы, находящейся в равновесном состоянии, параметры состояния связаны между собой соотношениями (**уравнениями состояния**):

уравнение Клапейрона (1834 г.) для газа заданной массы m

$$pV = mRT$$

или для 1 кг газа

$$pv = RT;$$

уравнение Менделеева – Клапейрона (1874 г.)

$$pV_{\mu} = \bar{R}T.$$

В данных выражениях:

p – абсолютное давление, Па;

V – объем газа, м³;

m – масса газа, кг;

R – газовая постоянная, Дж/(кг·К);

T – термодинамическая температура, К;

v – удельный объем, м³/кг;

V_{μ} – объем одного киломоля* газа, м³/кмоль;

\bar{R} – универсальная газовая постоянная, $\bar{R} = 8314$ Дж/(кмоль·К).

* Модем (киломодем) газа называется число граммов (кг) газа, равное его молекулярной массе, например: 1 кмоль $H_2 = 2$ кг, 1 кмоль $N_2 = 28$ кг.

Если в уравнении Клапейрона все переменные параметры перенести в левую часть, а постоянные – в правую, можно получить выражения для вычисления любого параметра при переходе от одного состояния к другому, если значения остальных параметров известны:

$$\frac{pV}{T} = mR = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \dots$$

$$\frac{pv}{T} = R = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} = \dots$$

Газовая постоянная R для соответствующего газа находится по формуле:

$$R = \frac{\bar{R}}{\mu} = \frac{8314}{\mu},$$

где μ – молекулярная масса газа, кг/кмоль.

В таблице 1.2 представлены молекулярные массы, плотности при нормальных условиях и газовые постоянные важнейших газов.

Таблица 1.2 – Характеристики важнейших газов

Вещество	Химическое обозначение	Молекулярная масса μ , кг/кмоль	Плотность ρ , кг/м ³	Газовая постоянная R , Дж / (кг · К)
Воздух	–	28,96	1,293	287,0
Кислород	O ₂	32,00	1,429	259,8
Азот	N ₂	28,026	1,251	296,8
Гелий	He	4,003	0,179	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	208,2
Водород	H ₂	2,016	0,090	4124,0
Окись углерода	CO	28,01	1,250	296,8
Двуокись углерода	CO ₂	44,01	1,977	188,9
Сернистый газ	SO ₂	64,06	2,926	129,8
Метан	CH ₄	16,032	0,717	518,8
Этилен	C ₂ H ₄	28,052	1,251	296,6
Коксовый газ	–	11,50	0,515	721,0
Аммиак	NH ₃	17,032	0,771	488,3

ЛЕКЦИЯ 2 – СМЕСИ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ. ТЕПЛОЕМКОСТЬ

2.1. Смесии идеальных газов

В термодинамических системах часто в качестве рабочего тела используется не химически однородный газ, а смеси различных газов. При рассмотрении смесей газов исходят из того, что смесь идеальных газов, не вступающих в химическое взаимодействие друг с другом, также является идеальным газом и подчиняется таким же законам.

Чтобы задать газовую смесь, необходимо назвать компоненты смеси и указать долю каждого из них. Состав смеси может быть задан в *массовых, объемных и молярных долях*.

Массовой долей i -го компонента g_i называют отношение массы этого компонента к массе всей смеси, т.е.: $g_i = m_i / m_{см}$.

Объемной долей i -го компонента r_i называют отношение *приведенного** объема этого компонента к объему всей смеси, т.е.: $r_i = V_i / V_{см}$.

* Под **приведенным объемом** газа понимают тот объем, который занял бы один этот газ при температуре и давлении смеси (рис. 2.1).

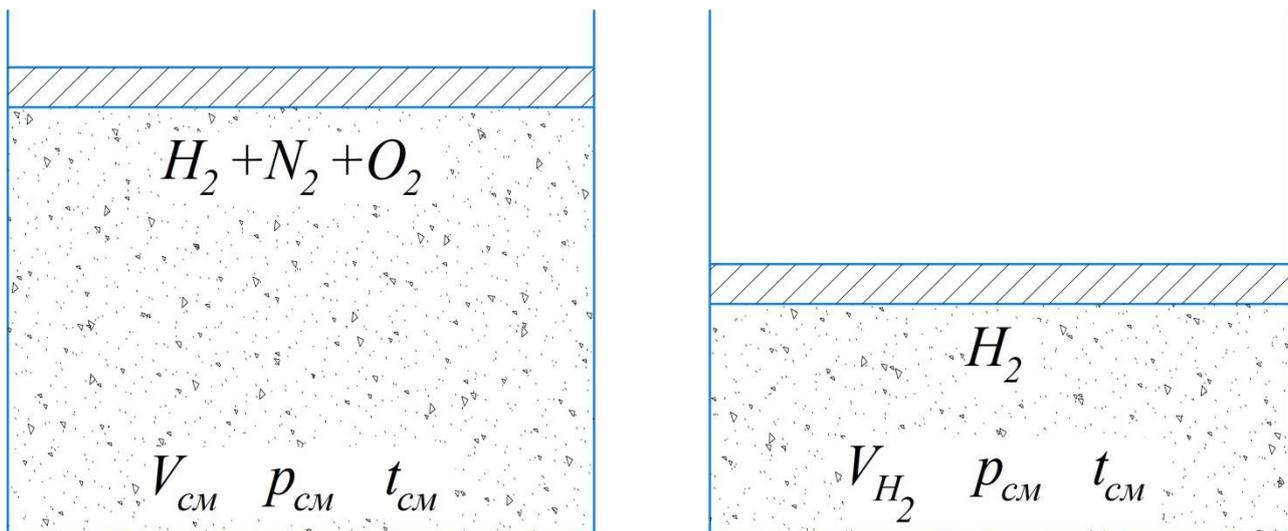


Рисунок 2.1 – Графическая интерпретация понятия "приведенный объем"

Поскольку для любой смеси объемные доли i -го компонента равны молярным, обычно состав смеси задают массовыми или объемными долями.

Для перевода *массовых долей* в объемные используют формулу:

$$r_i = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}.$$

Формула для перевода *объемных долей* в массовые имеет вид:

$$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}.$$

Поведение газовых смесей подчиняется закону Дальтона (1807 г.), согласно которому каждый газ, входящий в смесь, ведет себя так, как будто он один занимает весь объем смеси при данной температуре. Давление, которое при этом оказывает каждый компонент смеси на стенки сосуда, называется **парциальным**, а давление газовой смеси складывается из парциальных давлений газов, образующих газовую смесь:

$$p_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n p_i.$$

Например, для смеси, состоящей из H_2 , N_2 и O_2 парциальное давление $p_{\text{см}} = p_{H_2} + p_{N_2} + p_{O_2}$.

Другими словами, **парциальное давление** отдельно взятого газа, входящего в смесь – это давление, которое установилось бы в данном объеме (объеме смеси), если из него удалить все другие компоненты при неизменной температуре (рис. 2.2).

Парциальное давление i -го газа может быть найдено по формулам:

$$p_i = r_i \cdot p_{\text{см}};$$

$$p_i = g_i \cdot \frac{R_i}{R_{\text{см}}} \cdot p_{\text{см}}.$$

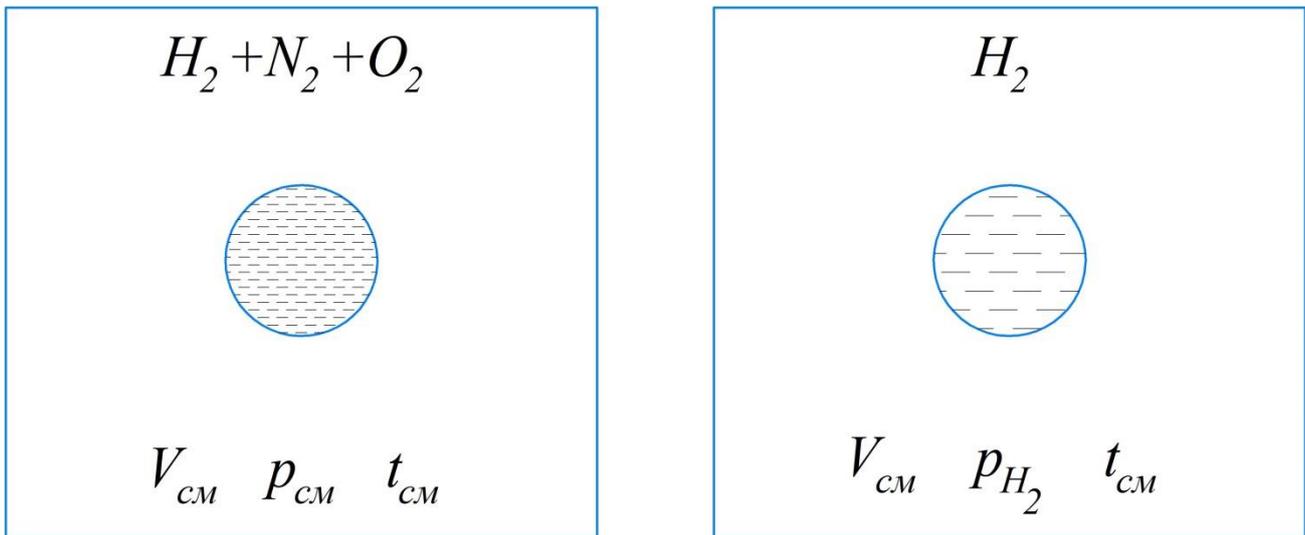


Рисунок 2.2 – Графическая интерпретация понятия "парциальное давление"

При расчете газовых смесей обычно определяют кажущуюся молекулярную массу, газовую постоянную, плотность, парциальные давления компонентов смеси, теплоемкость.

Значение *кажущейся молекулярной массы* газовой смеси $\mu_{см}$ (кг/кмоль) можно вычислить через объемные доли по формуле

$$\mu_{см} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i$$

или по массовому составу

$$\mu_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}} .$$

Выражения для определения газовой постоянной газовой смеси $R_{см}$ (Дж/кг·К) имеют вид:

$$R_{см} = \sum_{i=1}^n g_i R_i ;$$

$$R_{см} = \frac{\bar{R}}{\mu_{см}} = \frac{8314}{\mu_{см}} .$$

Плотность смеси $\rho_{\text{см}}$ (кг/м³) определяется из выражения

$$\rho_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \rho_i = r_1 \rho_1 + r_2 \rho_2 + \dots + r_n \rho_n$$

или, если известен массовый состав, по формуле

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}}$$

2.2. Теплоемкость идеальных газов

Теплоемкость является одной из важнейших теплофизических характеристик вещества. При этом в практических расчетах, как правило, пользуются значениями *удельных теплоемкостей*. Под **удельной теплоемкостью** вещества понимают количество теплоты, которое нужно сообщить или отвести от единицы вещества (кг, м³, кмоль), чтобы изменить его температуру на 1 °С (1 К). различают удельную массовую c (Дж/кг·°С), удельную объемную c' (Дж/м³·°С) и удельную молярную μc (Дж/кмоль·°С).

Эти теплоемкости связаны между собой соотношениями:

$$c = \frac{\mu c}{\mu}; \quad c' = \frac{\mu c}{22,4}; \quad c' = c \cdot \rho_{\text{н}},$$

где $\rho_{\text{н}}$ – плотность газа при нормальных условиях.

Значение теплоемкости газов зависит от рода газа, его температуры (с повышением температуры теплоемкость возрастает) и в наибольшей степени от процесса. Основными процессами в технике являются процессы при постоянном объеме (изохорный) и при постоянном давлении (изобарный), в связи с чем различают изохорные ($c_v, c'_v, \mu c_v$) и изобарные ($c_p, c'_p, \mu c_p$) теплоемкости.

Изобарная теплоемкость всегда больше изохорной, т.к. для нагрева 1 кг газа на 1 °С при $p = \text{const}$ часть энергии расходуется на совершение работы, обусловленной расширением газа:

$$c_p = c_v + R.$$

В практических расчетах, не требующих особой точности, зависимостью теплоемкости от температуры пренебрегают либо пользуются средней для данного интервала температур теплоемкостью, которую находят с использованием эмпирических формул или справочных таблиц.

Для идеального газа удельную массовую изохорную теплоемкость находят по формуле:

$$c_v = \frac{R}{k - 1},$$

где k – показатель адиабаты:

$k = 1,67$ – для одноатомных газов ($He, Ar \dots$);

$k = 1,4$ – для 2-атомных газов ($H_2, CO \dots$);

$k = 1,29$ – для многоатомных газов ($N_2O, CO_2 \dots$).

Удельная массовая теплоемкость газовой смеси определяется по формуле:

$$c_{см} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot c_i,$$

где c_i – удельная массовая теплоемкость i -го компонента.

Удельная объемная теплоемкость газовой смеси определяется по формуле:

$$c'_{см} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot c'_i,$$

где c'_i – удельная объемная теплоемкость i -го компонента.

ЛЕКЦИЯ 3 – ФУНКЦИИ СОСТОЯНИЯ. ТЕПЛОТА. РАБОТА. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

3.1. Функции состояния. Понятие теплоты

Кроме термодинамических параметров существуют величины, которые характеризуют состояние термодинамической системы или рабочего тела и носят название *функций состояния*. Их значение однозначно определяется параметрами состояния. Основными функциями состояния являются *внутренняя энергия* U (Дж), *энтальпия* I (Дж) и *энтропия* S (Дж/К). На практике, как правило, пользуются удельными величинами (отнесенными к 1 кг вещества).

Удельная внутренняя энергия u (Дж/кг) представляет собой сумму *кинетической энергии* микрочастиц вещества массой 1 кг, совершающих тепловое движение, и *энергии их взаимодействия*. $u = U / m$.

Кинетическая энергия – это сумма энергии поступательного и вращательного движения молекул и энергии внутримолекулярных колебаний. *Энергия взаимодействия* зависит от расстояния между молекулами и для идеального газа равна нулю.

Удельная энтальпия i (Дж/кг) представляет собой сумму удельной внутренней энергии u и произведения давления p на удельный объем v . $i = I / m$.

$$i = u + pv;$$

$$I = U + pV.$$

Также энтальпия может обозначаться символом h . Иначе ее называют теплосодержанием. Введение данного понятия существенно упрощает расчеты многих термодинамических процессов, вид и структуру некоторых формул.

Удельная энтропия s (Дж/кг·°С) – это функция состояния, которая широко используется теплотехнических расчетах и исследованиях. $s = S / m$. При рассмотрении большинства термодинамических процессов приходится иметь дело не с абсолютной величиной энтропии, а с изменением ее значения $\Delta s = s_2 - s_1$.

Важнейшее практическое значение энтропии заключается в том, что при построении графика процесса в $T-s$ координатах площадь под ним будет соответствовать количеству подводимой или отводимой удельной теплоты в процессе q . В $T-S$ координатах площадь соответствует теплоте в процессе Q . Поэтому изображение термодинамического процесса в $T-s$ (или в $T-S$) координатах называют **тепловой диаграммой**.

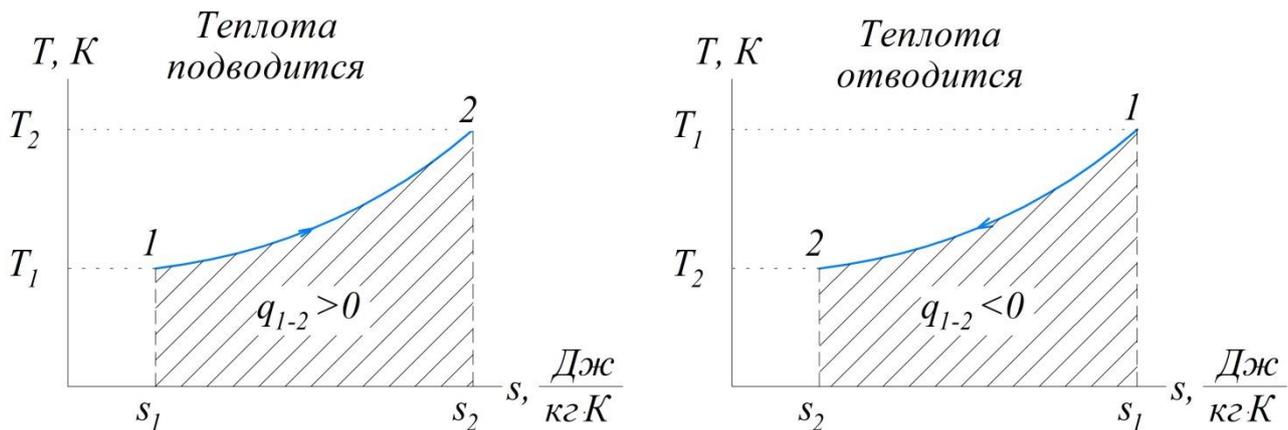


Рисунок 3.1 – К определению энтропии. Тепловая диаграмма

Следует отметить, что в процессах подвода теплоты (нагрева) значение энтропии возрастает, т.е. $s_2 - s_1 = \Delta s > 0$, а в процессах отвода теплоты (охлаждения) – уменьшается, т.е. $s_2 - s_1 = \Delta s < 0$.

Количество теплоты q в процессах, как правило, определяется через теплоемкость:

$$q = c \cdot \Delta T = c \cdot (T_2 - T_1).$$

где

c – удельная массовая теплоемкость для соответствующего процесса, ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}}$);

T_1 и T_2 – соответственно начальная и конечная температуры в процессе, К.

3.2. Общие сведения о термодинамических процессах

Термодинамическим процессом называется любое изменение параметров состояния термодинамической системы во времени. Различают *равновесные* и *неравновесные*, *обратимые* и *необратимые* процессы.

При *равновесном* процессе в каждый рассматриваемый момент времени система находится в равновесном состоянии, т.е. давление, температура и плотность рабочего тела постоянны по всей его массе.

В противном случае процесс является *неравновесным*. Например, в процессе сжатия газа в цилиндре наибольшее давление будет в слоях газа, расположенных ближе к поршню, а наименьшее – в слоях газа, наиболее удаленных от поршня.

Обратимыми являются процессы, протекающие без рассеивания энергии. При этом рабочее тело проходит через одни и те же промежуточные равновесные состояния как в прямом, так и в обратном направлении.

Все действительные процессы являются *необратимыми* и сопровождаются потерями энергии. Например, работа, затрачиваемая на преодоление сил трения, необратимо превращается в теплоту. Возвращение в исходное состояние возможно только при затрате энергии извне. Чем больше отклоняется необратимый процесс от обратимого, тем меньшая часть работы газа передается потребителю и тем больше ее тратится на необратимые потери (трение, теплообмен и т.д.).

Как показывает опыт, при расчетах тепловых установок можно пренебречь неравновесностью состояний без грубых погрешностей и принимать средние значения давления и температуры по всему объему.

3.3. Первый закон термодинамики. Понятие работы

Первый закон термодинамики по сути является законом сохранения и превращения энергии, который впервые в четкой форме был установлен Михаилом Васильевичем Ломоносовым. Его сущность заключается в том, что энергия не

создается и не уничтожается, а ее различные формы могут превращаться одна в другую в строго эквивалентных соотношениях.

Первый закон термодинамики может быть сформулирован следующим образом: *теплота, сообщенная системе, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение работы*. Математическая его запись имеет вид:

$$Q = \Delta U + L \quad \text{или} \quad q = \Delta u + l ,$$

где

q – удельная теплота, Дж/кг;

$\Delta u = u_2 - u_1$ – изменение удельной внутренней энергии, Дж/кг;

l – удельная работа расширения (сжатия), Дж/кг.

Все приведенные величины могут иметь как положительные, так и отрицательные значения. В термодинамике принята следующая система знаков:

$q > 0$ – теплота подводится к рабочему телу (процесс нагревания);

$q < 0$ – теплота отводится от рабочего тела (процесс охлаждения);

$\Delta u > 0$ – температура рабочего тела повышается ($T_2 > T_1$);

$\Delta u < 0$ – температура рабочего тела понижается ($T_2 < T_1$);

$l > 0$ – расширение газа (газ сам совершает положительную работу);

$l < 0$ – сжатие газа под действием внешних сил.

Работа, совершаемая 1 кг газа при его расширении (сжатии), может быть найдена по общей формуле:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p \cdot dv ,$$

где

v_1 и v_2 – соответственно начальный и конечный удельный объем газа в рассматриваемом процессе;

dv – элементарное (бесконечно малое) изменение объема.

Для графического определения работы удобно пользоваться так называемой *рабочей диаграммой*, изображаемой в p - v координатах. Площадь под графиком процесса при этом соответствует удельной работе l . В p - V координатах площадь соответствует работе L .

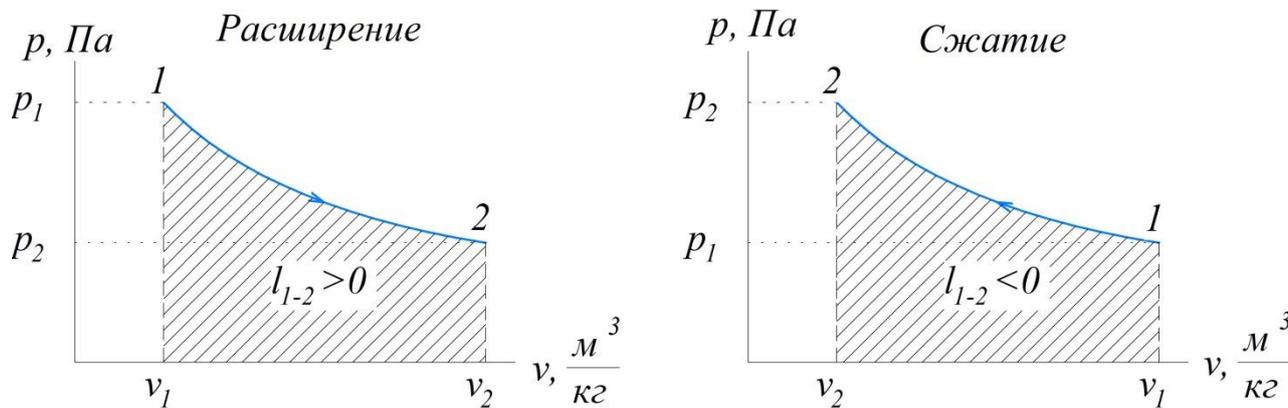


Рисунок 3.2 – К определению работы. Рабочая диаграмма

ЛЕКЦИЯ 4 – ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

4.1. Анализ основных термодинамических процессов

При анализе термодинамических процессов нас интересуют следующие вопросы:

- Уравнение процесса, которое устанавливает соотношение между параметрами состояния на любой момент времени в ходе процесса.
- Определение количества подводимой (или отводимой) к газу теплоты и совершаемой им (или внешними телами) работы.
- Изменение функций состояния в процессе.
- Графическое представление процессов в координатах p - v и T - s .

Среди бесконечного множества выделяют четыре основных процесса, которые протекают в условиях, ограничивающих характер изменения их состояния:

- 1) **Изохорный** – при постоянном объеме рабочего тела ($V = const$).
- 2) **Изобарный** – при постоянном давлении рабочего тела ($p = const$).
- 3) **Изотермический** – при постоянной температуре ($T = const$).
- 4) **Адиабатный** – при отсутствии теплообмена между рабочим телом и окружающей средой ($q = 0$).

Изменение удельной внутренней энергии для любого процесса рассчитывается по формуле:

$$\Delta u = c_v \cdot \Delta T = c_v \cdot (T_2 - T_1).$$

Изменение удельной энтальпии для любого процесса рассчитывается по формуле:

$$\Delta i = c_p \cdot \Delta T = c_p \cdot (T_2 - T_1).$$

4.2. Изохорный процесс

Пример изохорного процесса – нагревание или охлаждение газа в замкнутом пространстве ($V = const$ или $v = const$).

Уравнение **изохорного** процесса имеет вид:

$$\frac{p}{T} = const \quad \text{или} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3} = \dots$$

Учитывая, что при $v = const$ $dv = 0$, **удельная работа** $l_v = 0$:

$$l_v = \int_{v_1}^{v_2} p \cdot dv = 0.$$

Тогда, согласно первому закону термодинамики, **количество теплоты** в изохорном процессе будет определяться следующим образом:

$$q_v = \Delta u + l_v = \Delta u.$$

$$q_v = c_v \cdot \Delta T = c_v \cdot (T_2 - T_1).$$

Изменение удельной энтропии в изохорном процессе вычисляется по формуле:

$$\Delta s_v = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

В p - v и T - s координатах изохорный процесс изображается следующим образом:

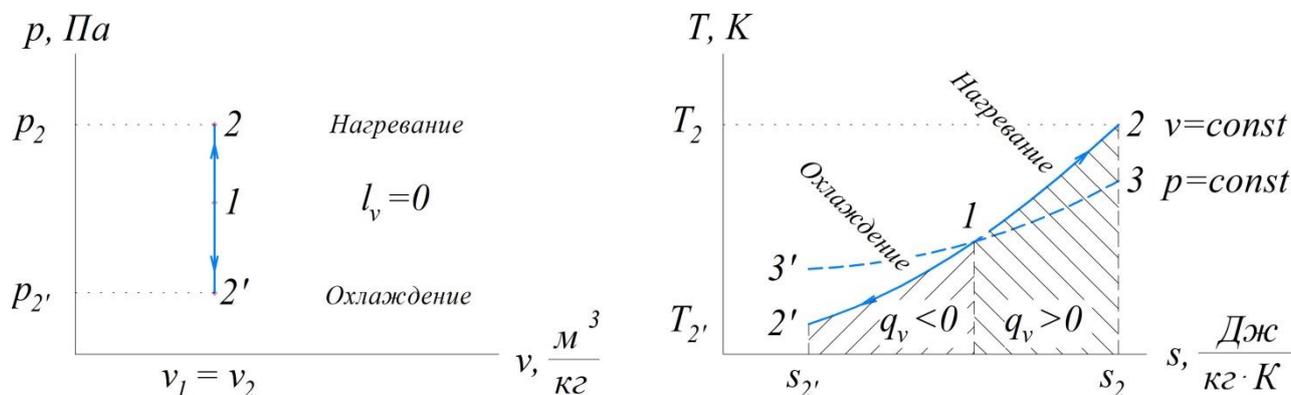


Рисунок 4.1 – Изохорный процесс в p - v и T - s координатах:

$1-2$ – изохорный подвод теплоты; $1-2'$ – изохорный отвод теплоты;

$1-3$ – изобарный подвод теплоты; $1-3'$ – изобарный отвод теплоты

4.3. Изобарный процесс

Уравнение **изобарного** процесса имеет вид:

$$\frac{v}{T} = const \quad \text{или} \quad \frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} = \frac{v_3}{T_3} = \dots$$

Удельная работа в изобарном процессе вычисляется по формуле:

$$l_p = \int_{v_1}^{v_2} p \cdot dv = p \int_{v_1}^{v_2} dv = pv_2 - pv_1 = p(v_2 - v_1) \quad \text{или}$$

$$l_p = R \cdot (T_2 - T_1).$$

Из второго уравнения видно, что газовая постоянная R представляет собой работу, производимую 1 кг газа в изобарном процессе при его нагревании на 1°C ($T_2 - T_1 = 1^\circ\text{C}$).

Удельная теплота может быть выражена через теплоемкость:

$$q_p = c_p \cdot (T_2 - T_1) = c_p \cdot \Delta T.$$

Изменение удельной энтропии в изобарном процессе вычисляется по формуле:

$$\Delta s_p = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

В p - v и T - s координатах изобарный процесс изображается следующим образом:

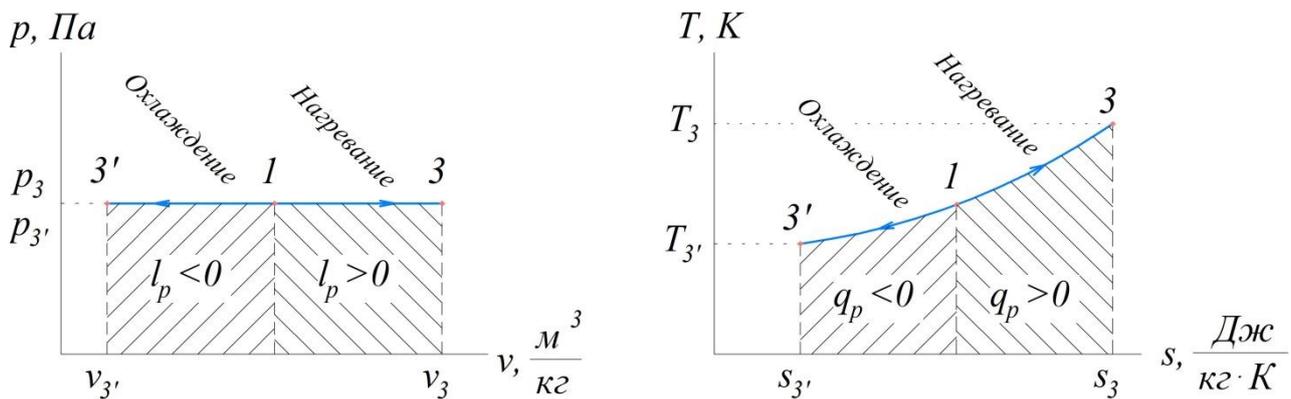


Рисунок 4.2 – Изобарный процесс в p - v и T - s координатах:

1-3 – изобарный подвод теплоты (расширение);

1-3' – изобарный отвод теплоты (сжатие)

4.4. Изотермический процесс

Уравнение **изотермического** процесса имеет вид:

$$pv = const \quad \text{или} \quad p_1 v_1 = p_2 v_2 = p_3 v_3 = \dots$$

Поскольку при $T = const$ значение $\Delta T = 0$, изменение внутренней энергии $\Delta u_t = c_v \cdot \Delta T = 0$. Тогда, согласно первому закону термодинамики, $q_t = l_t$.

Удельное количество теплоты и **удельная работа** в изотермическом процессе определяются по формулам:

$$q_t = l_t = RT \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Изменение удельной энтропии в изотермическом процессе вычисляется по формуле:

$$\Delta s_t = R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = R \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

В p - v и T - s координатах изотермический процесс изображается следующим образом:

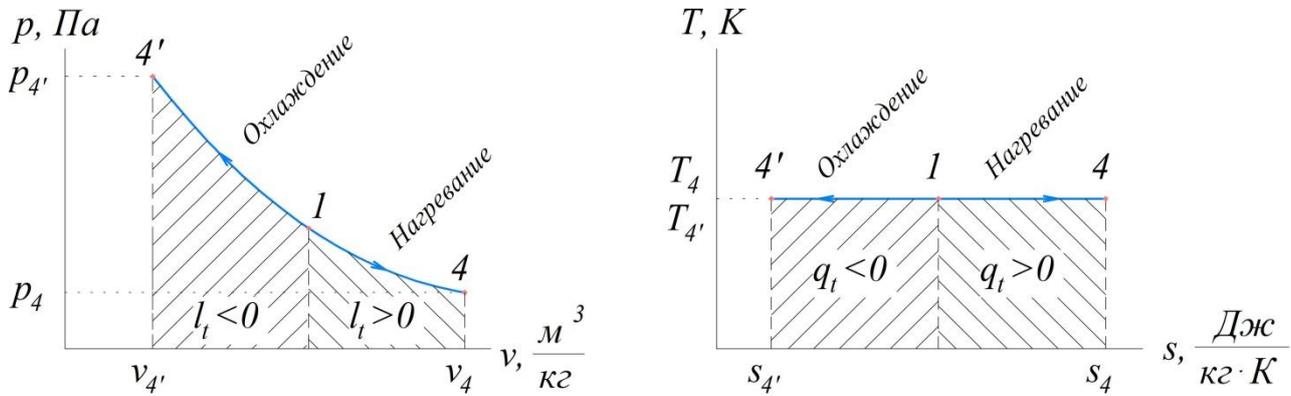


Рисунок 4.3 – Изотермический процесс в p - v и T - s координатах:

1 - 4 – изотермический подвод теплоты (расширение);

1 - $4'$ – изотермический отвод теплоты (сжатие)

4.5. Адиабатный процесс

Адиабатный процесс – это процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой, т.е. без подвода и отвода тепла ($q = 0$). При этом для обратимого адиабатного процесса также $\Delta s = 0$ ($s = const$), поэтому этот процесс иначе называют **изоэнтропийным**.

К адиабатным можно отнести процессы, протекающие достаточно быстро, когда теплообменом за время процесса можно пренебречь.

Уравнение **адиабатного** процесса имеет вид:

$$pv^k = const \quad \text{или} \quad p_1 v_1^k = p_2 v_2^k = p_3 v_3^k = \dots$$

где k – показатель адиабаты.

Параметры состояния в адиабатном процессе связаны между собой соотношениями:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Поскольку в адиабатном процессе $q = 0$, согласно первому закону термодинамики $q = \Delta u + l \rightarrow l = -\Delta u$ (работа совершается за счет внутренней энергии газа, при этом она уменьшается).

Удельная работа в адиабатном процессе определяется по формуле:

$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right).$$

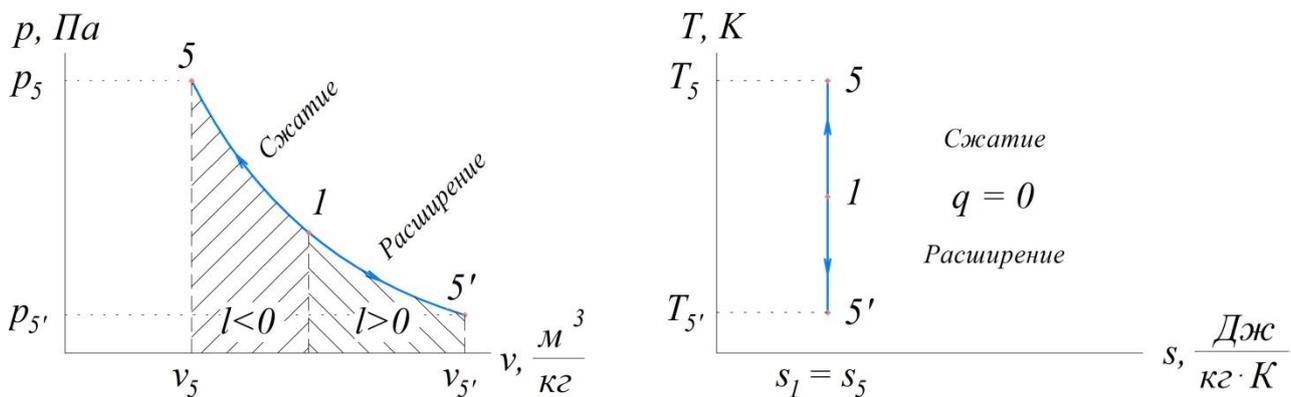


Рисунок 4.4 – Адиабатный процесс в p - v и T - s координатах:

1-5 – адиабатное сжатие; 1-5' – адиабатное расширение

4.6. Политропный процесс

Политропным называется обобщающий термодинамический процесс, в котором теплоемкость имеет любое, но постоянное на протяжении всего процесса значение.

Уравнение политропного процесса имеет вид:

$$pv^n = const \quad \text{или} \quad p_1 v_1^n = p_2 v_2^n = p_3 v_3^n = \dots$$

где n – показатель политропы ($-\infty \leq n \leq +\infty$).

Рассмотренные ранее основные процессы являются частными случаями политропного процесса:

- при $n = 0$: $pv^0 = p = const$ – изобарный процесс;

- при $n = 1$: $pv^1 = pv = const$ – изотермический процесс;
- при $n = k$: $pv^k = const$ – адиабатный процесс;
- при $n = \pm\infty$: $p^0v = v = const$ – изохорный процесс*.

* Для доказательства справедливости данного результата приведем следующие математические преобразования:

1) Возведем обе части уравнения политропного процесса в степень $1/n$:

$$(pv^n)^{\left(\frac{1}{n}\right)} = const \rightarrow p^{\left(\frac{1}{n}\right)} \cdot v = const.$$

2) Подставим вместо n значения $+\infty$ и $-\infty$, тогда степень

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{\pm\infty} \approx \pm 0 = 0.$$

Таким образом, справедливость записи уравнения политропного процесса в виде $v = const$ (при $n = \pm\infty$) подтверждается.

В политропном процессе доля теплоты, идущая на изменение внутренней энергии системы, называется **характеристикой политропного процесса**:

$$\varphi = \frac{\Delta U}{Q} = \frac{\Delta u}{q} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{c_v \cdot \Delta T}{c \cdot \Delta T} = \frac{c_v}{c},$$

где

$$c_v = \frac{R}{k-1} - \text{удельная массовая изохорная теплоемкость};$$

c – удельная массовая изохорная теплоемкость политропного процесса.

Показатель политропы и теплоемкость политропного процесса связаны между собой соотношениями:

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v} \quad \text{и} \quad c = c_v \cdot \frac{n - k}{n - 1},$$

где c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость:

$$c_p = c_v + R \quad \text{или} \quad c_p = c_v \cdot k.$$

Показатель политропы и характеристика политропного процесса связаны соотношениями:

$$n = \frac{k\varphi - 1}{\varphi - 1} \quad \text{и} \quad \varphi = \frac{n - 1}{n - k}.$$

Параметры состояния в политропном процессе связаны между собой соотношениями:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

Количество теплоты в политропном процессе находится по формулам:

$$q = c \cdot \Delta T \quad \text{или} \quad q = c_v \cdot \frac{n - k}{n - 1} \cdot \Delta T.$$

Удельная работа в политропном процессе вычисляется по формулам:

$$l = \frac{1}{n - 1} \cdot (p_1 v_1 - p_2 v_2),$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{n - 1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right).$$

Изменение удельной энтропии в политропном процессе определяется следующим образом:

$$\Delta s = c \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} \quad \text{или} \quad \Delta s = c_v \cdot \frac{n - k}{n - 1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

График в координатах p - v и T - s определяется уравнением политропного процесса $pv^n = const$, т.е. зависит от значения показателя политропы n .

ЛЕКЦИЯ 5 – КРУГОВЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

5.1. Общие сведения

Круговым процессом или циклом называется совокупность последовательных термодинамических процессов, в результате осуществления которых система возвращается в исходное состояние. Различают *обратимые* и *необратимые*, *прямые* и *обратные* циклы.

Обратимый цикл состоит только из обратимых процессов, в противном случае цикл является **необратимым**.

Цикл называется **прямым**, если в координатах p - v и T - s он осуществляется по часовой стрелке (линии процессов расширения расположены в верхней части p - v диаграммы). По прямым циклам работают все тепловые двигатели.

Обратный цикл в координатах $p-v$ и $T-s$ осуществляется против часовой стрелки (линии процессов сжатия расположены в верхней части $p-v$ диаграммы). Обратные циклы осуществляются в холодильных установках.

Рассмотрим изменение состояния рабочего тела в такой непрерывно действующей машине, как поршневой тепловой двигатель. Для этого построим произвольный прямой цикл в $p-v$ диаграмме (рис. 5.1).

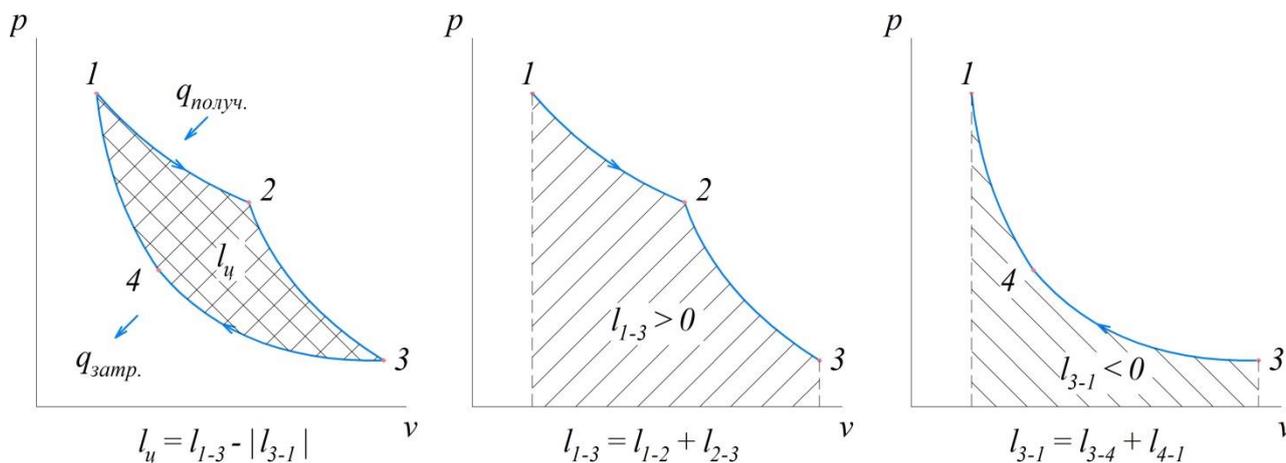


Рисунок 5.1 – Произвольный прямой цикл в $p-v$

Полученная работа $l_{ц}$ (площадь фигуры 1-2-3-4) может быть использована для движения машин и механизмов и называется полезной работой или работой цикла. Она равна сумме работ всех процессов цикла.

Если рабочее тело в прямом цикле в процессе расширения 1-2-3 получило от горячего источника теплоту $q_{получ.}$, а в процессе сжатия отдало холодному источнику теплоту $q_{затр.}$, то разность $q_{получ.} - q_{затр.} = q_{ц.}$ называется **полезной теплотой**, которая преобразовывается в механическую энергию, т.е. $q_{ц.} = l_{ц.}$.

Таким образом, непрерывно действующая тепловая машина должна работать по определенному циклу и иметь как минимум два источника теплоты с температурами T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$). Поэтому невозможно перевести в полезную работу всю теплоту, подведенную к рабочему телу. Часть этой теплоты в виде $q_{затр.}$ должна быть отдана холодному источнику (T_2), и только разность между этими количествами теплоты превращается в механическую энергию.

В идеальных тепловых машинах, в которых отсутствуют потери на трение, излучение, утечки рабочего тела и другие потери, степень совершенства цикла оценивается термическим КПД:

$$\eta_t = \frac{q_{\text{получ.}} - q_{\text{затр.}}}{q_{\text{получ.}}} \quad \text{или} \quad \eta_t = \frac{q_{\text{ц}}}{q_{\text{получ.}}} = \frac{l_{\text{ц}}}{q_{\text{получ.}}}$$

Термический КПД показывает, какая часть полученной теплоты (например, теплоты сгорания бензина) преобразуется в полезную энергию. Повышения КПД можно достичь путем наиболее целесообразного подбора процессов, из которых образуется цикл.

Вопрос о максимальной доле теплоты, которая при заданных условиях может быть превращена в механическую энергию, был решен в 1824 году французским инженером и ученым Сади Карно. Он предложил цикл, названный циклом Карно.

5.2. Прямой обратимый цикл Карно

Цикл Карно представлен на рисунке в p - v и T - s координатах. Рабочее тело (1 кг газа) находится в цилиндре с поршнем. Стенки цилиндра имеют идеальную теплоизоляцию, но при необходимости газ может обмениваться теплотой с горячим и холодным источниками, имеющими температуру соответственно T_1 и T_2 .

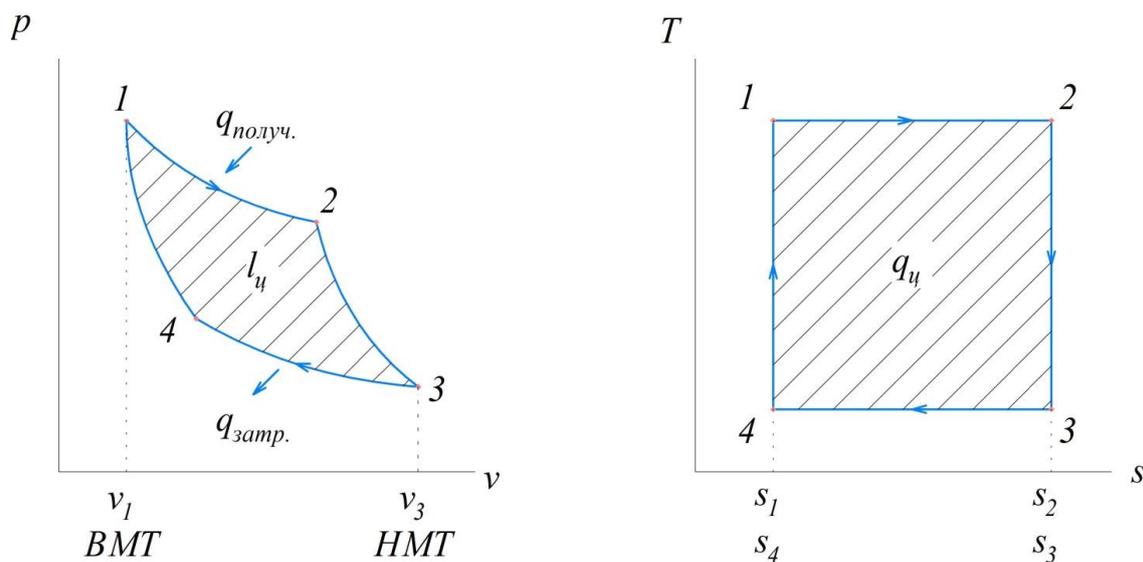


Рисунок 5.2 – Цикл Карно в p - v и T - s координатах

На данном рисунке изображены следующие процессы:

1-2: процесс изотермического расширения – газ соприкасается с горячим источником и получает от него количество теплоты $q_{\text{получ.}}$;

2-3: процесс адиабатного расширения – теплообмен с окружающей средой отсутствует, и работа совершается за счет уменьшения внутренней энергии газа, температура при этом уменьшается до значения T_2 ;

3-4: процесс изотермического сжатия – газ соприкасается с холодным источником, имеющем температуру T_2 , и отдает ему теплоту $q_{\text{затр.}}$, чтобы при уменьшении объема газа его температура оставалась постоянной;

4-1: процесс адиабатного сжатия – газ возвращается в исходное *состояние* 1 без обмена теплотой с окружающей средой, поэтому затрачиваемая работа идет на увеличение внутренней энергии газа и, соответственно, на повышение его температуры до значения T_1 .Далее цикл повторяется.

Термический КПД теплового двигателя, работающего по циклу Карно, определяется по общей формуле:

$$\eta_t = \frac{q_{\text{ц}}}{q_{\text{получ.}}} = 1 - \frac{q_{\text{затр.}}}{q_{\text{получ.}}}.$$

В данных выражениях:

$q_{\text{ц}}$ определяется площадью фигуры 1-2-3-4, т.е. $q_{\text{ц}} = \Delta T \cdot \Delta s$;

$q_{\text{получ.}}$ – площадью фигуры 1-2- s_2 - s_1 , т.е. $q_{\text{получ.}} = T_1 \cdot \Delta s$.

$q_{\text{затр.}}$ – площадью фигуры 3-4- s_1 - s_2 , т.е. $q_{\text{затр.}} = T_2 \cdot \Delta s$.

С учетом этого формула для вычисления термического КПД примет вид:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2 \cdot \Delta s}{T_1 \cdot \Delta s} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Из этой формулы следует:

1) значение η_t зависит только от температуры холодного и горячего источников;

2) значение η_t увеличивается при возрастании температуры горячего источника T_1 и при уменьшении температуры холодного источника T_2 ;

3) достичь значения КПД $\eta_t = 1$ (100 %) возможно только при условии $T_2/T_1 = 0$, а это возможно при $T_2 = 0$ К (-273,15 °С) или при $T_1 = \infty$. Оба варианта неосуществимы на практике. Как правило, $T_2 = 260...300$ К (температура окружающей среды), $T_1 \approx 2500$ К (в поршневых ДВС).

5.3. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС)

Поршневые ДВС являются одними из самых распространенных тепловых двигателей. С теоретической точки зрения желательно, чтобы в ДВС осуществлялся цикл Карно, однако на практике он оказывается неэффективным.

В термодинамике рассматриваются 3 цикла работы поршневых ДВС:

- 1) с подводом теплоты по изохоре – цикл Отто;
- 2) с подводом теплоты по изобаре – цикл Дизеля;
- 3) с изохорно-изобарным подводом теплоты – цикл Сабатэ (Тринклера).

Рассмотрим более подробно цикл с изохорно-изобарным подводом теплоты (рис. 5.3).

ЛЕКЦИЯ 6 – ВОДЯНОЙ ПАР

6.1. Общие сведения

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

Имея высокое давление и относительно низкую температуру, пар, используемый в приведенных тепловых агрегатах, близок к состоянию жидкости, поэтому пренебрегать силами взаимодействия между молекулами пара и их размерами, как в идеальных газах, нельзя. Поэтому водяной пар считается *реальным газом* и не подчиняется уравнению состояния для идеальных газов, т.е. $pv \neq RT$.

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

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

Обратный парообразованию процесс называется **конденсацией**, а образующаяся жидкость – **конденсатом**.

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

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

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

Влажным называется пар, который получается при неполном испарении жидкости, т.е. это смесь сухого пара и кипящей жидкости. Влажный пар характеризуется степенью сухости x , которая представляет собой массовую долю сухого насыщенного пара во влажном:

$$x = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{п}} + m_{\text{ж}}}, \quad (6.1)$$

где

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

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

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

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

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

При увеличении давления температура кипения воды повышается, при уменьшении давления – снижается. Например, при пониженном давлении 0,1 бар вода закипает при температуре 44,83 °С, при пониженном давлении 0,5 бар – при температуре 81,35 °С, при обычном атмосферном давлении 1 бар – при температуре 99,63 °С, при повышенном давлении 10 бар – при температуре 179,88 °С (рис. 6.3).

6.2. Фазовые переходы

Химически чистые вещества в зависимости от условий могут находиться в одном из трех агрегатных состояний – газообразном, жидком и твердом. Также существует состояние плазмы, но в классической термодинамике область плазмы не рассматривается. Переход вещества из одного агрегатного состояния (фазы) в другое называется **фазовым переходом**, который, как правило, связан с подводом или отводом теплоты.

Области существования вещества в том или ином агрегатном состоянии удобно представлять на диаграмме фазовых переходов. Качественно эта диаграмма выглядит одинаково для любых веществ, отличаясь лишь конкретными значениями параметров. Диаграмма в координатах p - T позволяет установить, в каком агрегатном состоянии в зависимости от температуры и давления находится вещество.

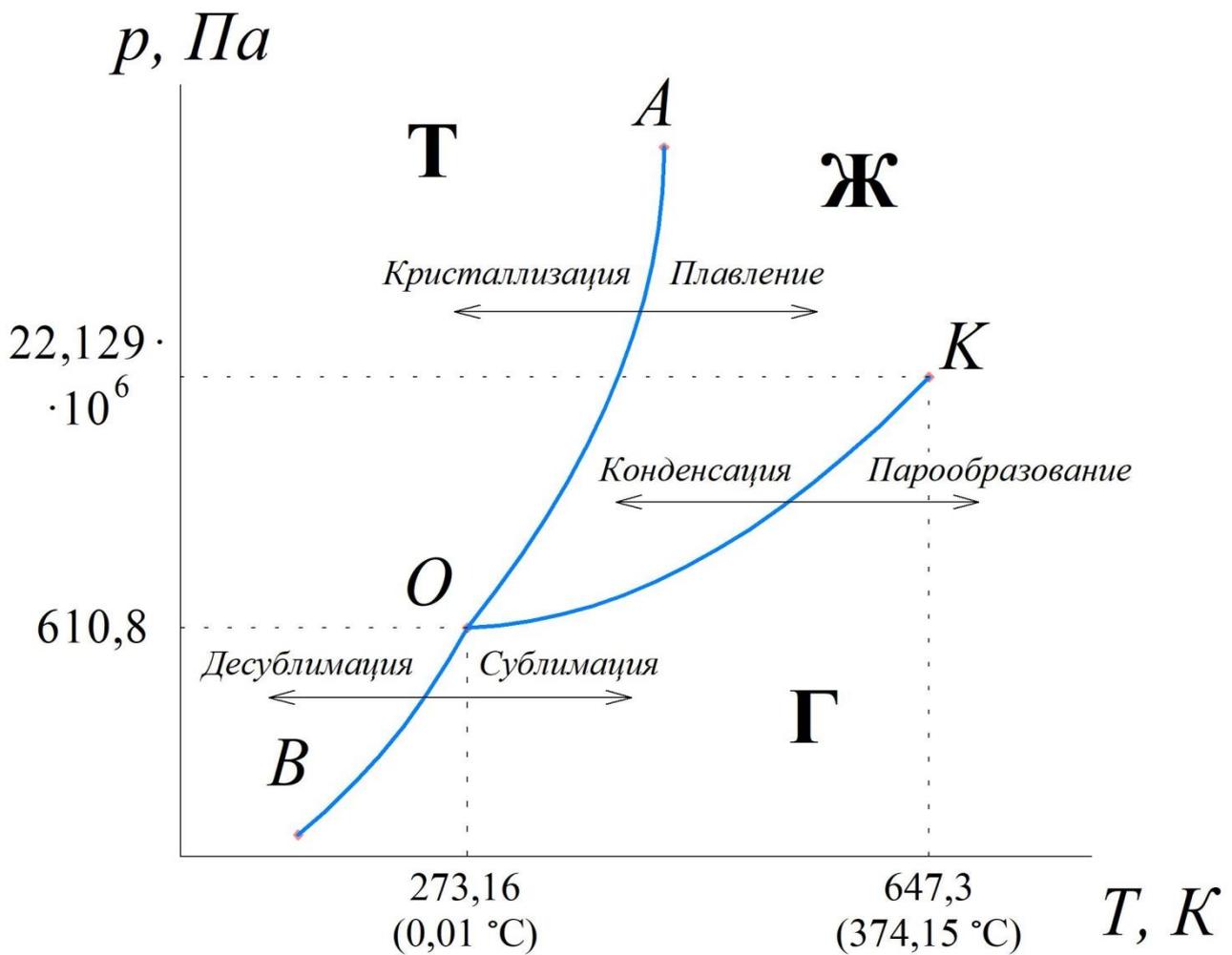


Рисунок 6.1 – Диаграмма фазовых переходов для воды

Фазовый переход, осуществляемый при постоянном давлении, происходит при постоянной температуре. Количество теплоты, которое необходимо подвести или отвести от одного килограмма вещества при постоянном давлении, чтобы перевести его из одного агрегатного состояния в другое, называют **теплотой фазового перехода**. Она зависит от рода вещества, вида фазового перехода и от давления. Фазовый переход является обратимым процессом, т.е. если фазовый переход происходил при подводе теплоты, то для обратного перехода при неизменном давлении необходимо отвести такое же количество теплоты.

Переход вещества из твердого состояния в газообразное, минуя жидкую фазу, называется **сублимацией**. Процесс сублимации (десублимации) возможен при давлении ниже давления тройной точки "O". **Тройной точкой** называется

состояние вещества, при котором в термодинамическом равновесии находятся все три фазы.

Критическая точка "К" соответствует температуре, выше которой вещество может находиться только в газообразном состоянии.

Рассмотрим процесс изменения состояния 1 кг льда температурой $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ при атмосферном давлении $B = 1\text{ бар}$ в результате подвода теплоты q .

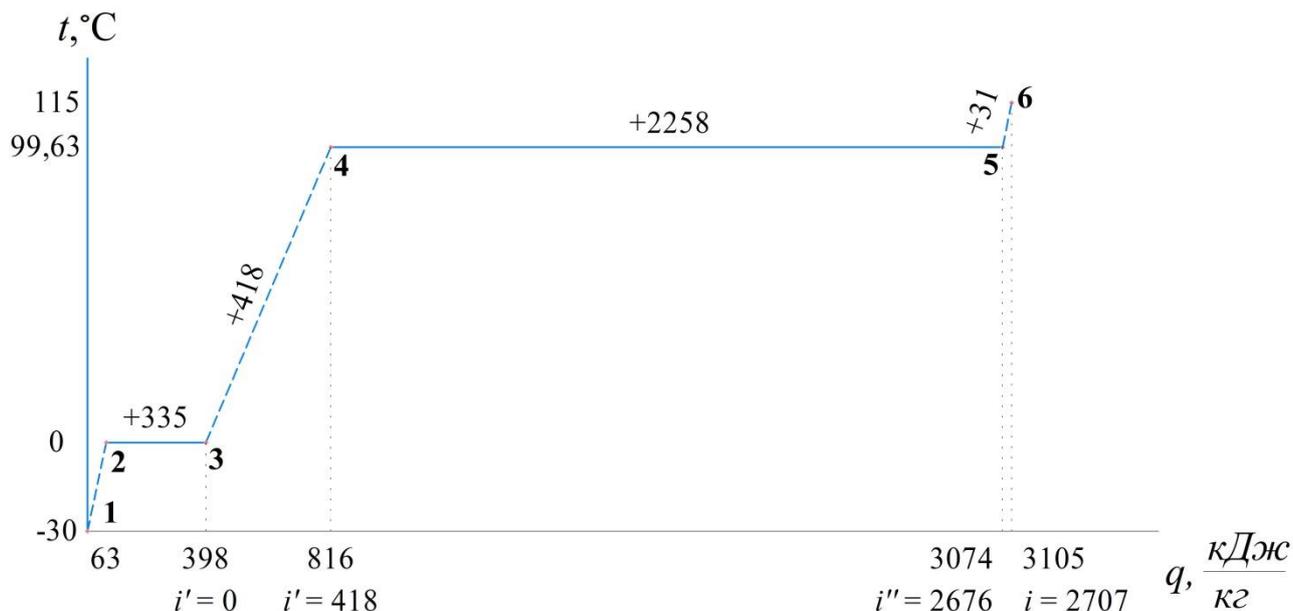


Рисунок 6.2 – Изменение состояния 1 кг льда в результате подвода теплоты

1-2: процесс нагревания 1 кг льда до температуры плавления $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Количество затрачиваемой теплоты:

$$q_{1-2} = c_{\text{л}} \cdot \Delta t = 2,1\text{ кДж/кг}\cdot^{\circ}\text{C} \cdot 30\text{ }^{\circ}\text{C} = 63\text{ кДж/кг.}$$

2-3: процесс плавления льда. При этом вся энергия идет на изменение агрегатного состояния вещества, и температура остается постоянной. Удельная теплота плавления льда $q_{2-3} \approx 335\text{ кДж/кг}$.

3-4: процесс нагревания воды от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $99,63\text{ }^{\circ}\text{C}$ (до температуры кипения воды при давлении 1 бар). Точка 4 соответствует состоянию кипящей жидкости или влажному пару со степенью сухости $x = 0$.

$$q_{3-4} = c_{\text{в}} \cdot \Delta t = 4,19\text{ кДж/кг}\cdot^{\circ}\text{C} \cdot 99,63\text{ }^{\circ}\text{C} = 418\text{ кДж/кг.}$$

4-5: процесс парообразования. При этом вся энергия идет на осуществление фазового перехода, и температура остается постоянной. Точка 5 соответ-

стует состоянию сухого насыщенного пара (или влажного пара со степенью сухости $x = 1$). Удельная теплота парообразования $r = q_{4-5} \approx 2258$ кДж/кг берется из таблицы «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлению)» (рис. 6.3).

P_s	t_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
0,150	52,58	0,0010133	10,696	220,03	2596,4	2376,4	0,7367	8,0330
0,200	58,98	0,0010166	8,0288	246,83	2607,7	2360,9	0,8182	7,9269
0,250	64,08	0,0010194	6,4483	268,18	2616,6	2348,4	0,8820	7,8462
0,300	68,35	0,0010219	5,3998	286,05	2624,0	2337,9	0,9346	7,7811
0,400	75,89	0,0010265	3,9949	317,65	2636,8	2319,2	1,0261	7,6711
0,500	81,35	0,0010301	3,2415	340,57	2646,0	2305,4	1,0912	7,5951
0,550	83,74	0,0010317	2,9648	350,61	2650,0	2299,4	1,1194	7,5627
0,600	85,95	0,0010333	2,7329	359,93	2653,6	2293,7	1,1454	7,5332
0,650	88,02	0,0010347	2,5357	368,62	2657,0	2288,4	1,1696	7,5061
0,700	89,96	0,0010361	2,3658	376,77	2660,2	2283,4	1,1921	7,4811
0,750	91,78	0,0010375	2,2179	384,45	2663,2	2278,8	1,2132	7,4577
0,800	93,51	0,0010387	2,0879	391,72	2666,0	2274,3	1,2330	7,4360
0,850	95,14	0,0010400	1,9728	398,63	2668,6	2270,0	1,2518	7,4155
0,900	96,71	0,0010412	1,8701	405,21	2671,1	2265,9	1,2696	7,3963
0,950	98,20	0,0010423	1,7779	411,49	2673,5	2262,0	1,2865	7,3781
1,000	99,63	0,0010434	1,6946	417,51	2675,7	2258,2	1,3027	7,3608
1,50	111,37	0,0010530	1,1597	467,13	2693,9	2226,8	1,4336	7,2248
2,00	120,23	0,0010608	0,88592	504,7	2706,9	2202,2	1,5301	7,1286
2,50	127,43	0,0010675	0,71881	535,4	2717,2	2181,8	1,6072	7,0540
3,00	133,54	0,0010735	0,60586	561,4	2725,5	2164,1	1,6717	6,9930
3,50	138,88	0,0010789	0,52425	584,3	2632,5	2148,2	1,7273	6,6412
4,00	143,62	0,0010839	0,4624	604,7	2738,5	2133,8	1,7764	6,8966

Рисунок 6.3 –Фрагмент таблицы «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлению)»

5-6: процесс нагревания (перегрева) сухого насыщенного пара. Величина $\Delta t = 15$ °С является степенью перегрева пара. Прямая 5-6 (за исключением точки 5) соответствует перегретому пару. Количество затрачиваемой теплоты:

$$q_{5-6} = i - i'' = 2707 - 2676 = 31 \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпии перегретого пара i и сухого насыщенного пара i'' берутся соответственно из таблиц для перегретого (рис. 6.4) и насыщенного водяного пара (рис. 6.3).

t	$p = 0,80$ бар			$p = 0,90$ бар			$p = 1,00$ бар			$p = 2,00$ бар		
	v	h	s									
$^{\circ}\text{C}$	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)									
0	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010001	0,2	-0,0001
10	0,0010002	42,1	0,1510	0,0010002	42,1	0,1510	0,0010002	42,1	0,1510	0,0010002	42,2	0,1510
30	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,8	0,4365	0,0010042	125,8	0,4364
40	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010078	167,5	0,5721	0,0010077	167,6	0,5720
90	0,0010361	376,9	1,1925	0,0010361	377,0	1,1925	0,0010361	377,0	1,1925	0,0010361	377,0	1,1924
110	2,187	2698,9	7,5239	1,942	2697,8	7,4673	1,745	2696,7	7,4164	0,0010518	461,4	1,4184
120	2,247	2718,8	7,5750	1,995	2717,8	7,5187	1,793	2716,8	7,4681	0,0010606	503,7	1,5276
160	2,484	2797,5	7,7658	2,206	2796,9	7,7103	1,984	2796,2	7,6605	0,9842	2789,5	7,3285
200	2,718	2876,1	7,9393	2,415	2875,6	7,8842	2,172	2875,2	7,8348	1,080	2870,4	7,5073
240	2,952	2955,0	8,0994	2,623	2954,7	8,0445	2,359	2954,3	7,9954	1,175	2950,8	7,6703
280	3,184	3034,6	8,2486	2,829	3034,3	8,1939	2,546	3034,0	8,1449	1,269	3031,2	7,8213
320	3,416	3114,9	8,3888	3,036	3114,7	8,3342	2,732	3114,4	8,2853	1,363	3112,2	7,9626
360	3,648	3196,1	8,5213	3,242	3195,9	8,4668	2,917	3195,7	8,4179	1,456	3193,8	8,0958
400	3,879	3278,3	8,6472	3,448	3278,1	8,5927	3,103	3278,0	8,5439	1,549	3276,4	8,2223
440	4,111	3361,5	8,7672	3,653	3361,3	8,7127	3,288	3361,2	8,6640	1,642	3359,8	8,3427
480	4,342	3445,7	8,8821	3,859	3445,6	8,8276	3,473	3445,4	8,7789	1,735	3444,3	8,4578
520	4,573	3530,9	8,9924	4,065	3530,8	8,9379	3,658	3530,7	8,8892	1,828	3529,7	8,5683
560	4,804	3617,3	9,0986	4,270	3617,2	9,0441	3,843	3617,1	8,9954	1,920	3616,2	8,6748
600	5,035	3704,7	9,2011	4,475	3704,6	9,1466	4,028	3704,5	9,0979	2,013	3703,7	8,7774

Рисунок 6.4 – Фрагмент таблицы «Термодинамические свойства воды и перегретого пара»

Для возвращения вещества в исходное состояние 1 необходимо отвести такое же количество теплоты ($q_{1-2} + q_{2-3} + \dots + q_{5-6}$). При этом процесс 5-4 является конденсацией, процесс 3-2 – кристаллизацией.

6.3. Определение параметров состояния водяного пара

Существуют таблицы (рис. 6.3, 6.4), в которых в зависимости от давления и температуры приводятся основные параметры пара. Все величины, относящиеся к жидкости при температуре насыщения (кипения), даются с одним штрихом ($v', i' \dots$), а величины, относящиеся к сухому насыщенному пару – с двумя штрихами ($v'', i'' \dots$).

При расчетах, связанных с использованием водяного пара как рабочего тела, наиболее широко используется удельная энтальпия. При составлении таблиц водяного пара энтальпию воды при 0°C обычно считают равной 0.

Ниже представлены формулы для определения параметров состояния воды и водяного пара.

Удельная энтальпия конденсата $i_{\text{в}}$ (кДж/кг):

$$i_{\text{в}} = c_p \cdot t, \quad (6.2)$$

где

c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость воды. Для не требующих особой точности расчетов $c_p \approx 4,19$ кДж/кг·°С;

t – температура конденсата (воды), °С.

Удельная энтальпия кипящей воды i' (кДж/кг):

$$i' = c_p \cdot t_{\text{н}}, \quad (6.3)$$

где

c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость кипящей воды, кДж/кг·°С;

$t_{\text{н}}$ – температура кипящей воды, °С.

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

$$i'' = i' + r, \quad (6.4)$$

где

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

r – теплота парообразования, кДж/кг.

Удельная энтальпия влажного пара i_x (кДж/кг):

$$i_x = i' + x \cdot r, \quad (6.5)$$

где

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

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

r – теплота парообразования, кДж/кг.

Удельная энтальпия перегретого пара $i_{\text{п}}$ (кДж/кг):

$$i_{\text{п}} = i'' + c_p \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{н}}), \quad (6.6)$$

где

i'' – удельная энтальпия сухого насыщенного пара, кДж/кг;

$t_{\text{п}}$ – температура перегретого пара, °С;

$t_{\text{н}}$ – температура насыщения для данного давления, °С.

c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость перегретого пара, кДж/кг·°С. Ее значение зависит от температуры и давления.

Для облегчения расчетов физических величин состояний водяного пара удобно пользоваться таблицами для кипящей воды, сухого и перегретого пара в зависимости от давления и температуры.

Еще более упрощает расчеты использование i - s диаграммы.

6.4. Использование i - s диаграммы для водяного пара

Диаграмма в i - s координатах (рис. 6.5) широко применяется для исследования процессов и циклов водяного пара. С ее помощью по положению точки, соответствующей определенному состоянию пара, можно легко определить значения всех параметров этого пара (p , v , t , i , s). Для этого достаточно знать значения двух любых параметров из перечисленных (обычно это давление p и температура t). Удельную внутреннюю энергию определяют по формуле:

$$u = i - pv. \quad (6.7)$$

где

i – удельная энтальпия пара, кДж/кг;

p – давление пара, Па;

v – удельный объем, кг/м³.

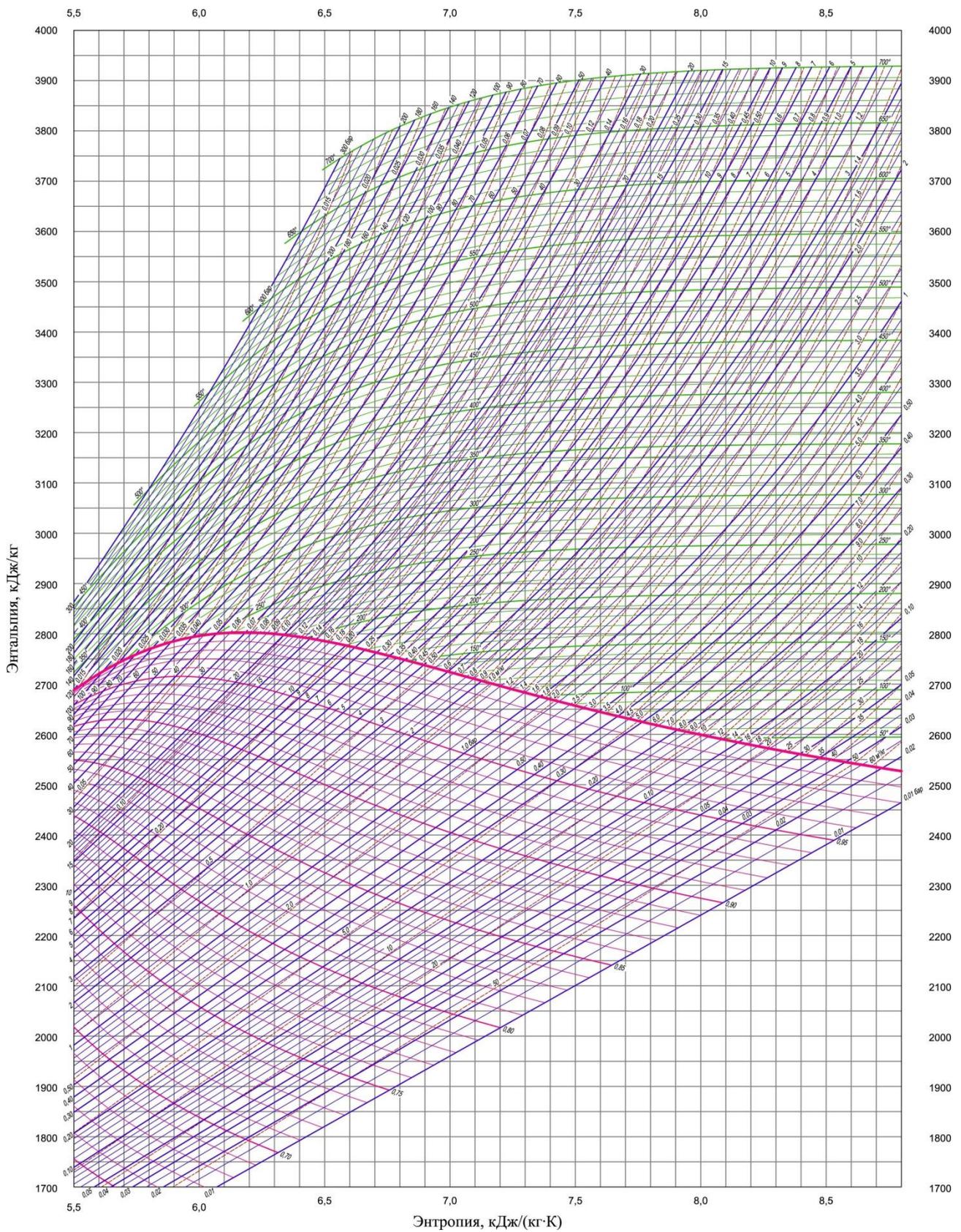


Рисунок 6.5 – Диаграмма $i-s$ для водяного пара

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

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

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

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

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

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

Также на диаграмме (рис. 6.6) представлено семейство изобар (синих линий постоянного давления $p = const$), изохор (красных пунктирных линий постоянного удельного объема $v = const$), изотерм (зеленых линий постоянных температур $t = const$) в области перегретого пара и красных линий постоянной степени сухости в области влажного пара ($x = const$). Вертикальные и горизонтальные линии относятся соответственно к энтропии и энтальпии.

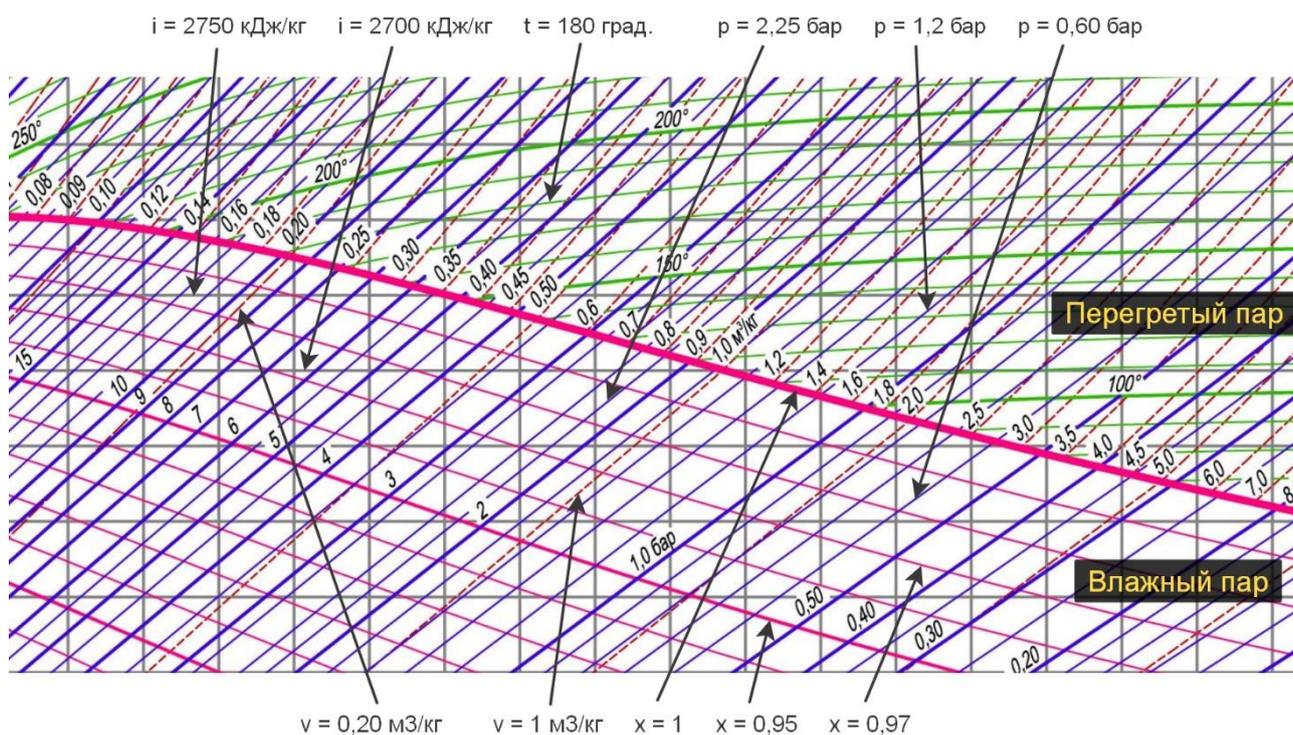


Рисунок 6.6 – Фрагмент диаграмма i - s водяного пара

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

При определении температуры влажного пара по диаграмме необходимо помнить, что его температура не зависит от степени сухости, т.е. от состояния кипящей воды ($x = 0$) до состояния сухого насыщенного пара ($x = 1$) при постоянном давлении температура пара не меняется и соответствует температуре насыщения t_n . Таким образом, достаточно найти точку пересечения соответствующей изобары и линии $x = 1$ и определить, какая изотерма приходит в эту точку. Например, давлению 1 бар соответствует $t_n \approx 100$ °С (99,63 °С по таблице), давлению 5 бар – $t_n \approx 152$ °С (151,85 °С по таблице).

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

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

ЛЕКЦИЯ 7 – ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

7.1. Общие сведения

Атмосферный воздух является газовой смесью, включающей в себя азот, кислород, углекислый газ, небольшое количество инертных газов, а также *водяной пар*. Смесью *сухого воздуха с водяным паром* называется **влажным воздухом**. С влажным воздухом приходится иметь дело при расчетах вентиляции, процессов горения топлива, систем для кондиционирования воздуха, процессов сушки.

В соответствии с законом Дальтона атмосферное давление влажного воздуха B определяется по формуле:

$$B = p_{\text{с.в.}} + p_{\text{п}}, \quad (7.1)$$

где $p_{\text{с.в.}}$ и $p_{\text{п}}$ – парциальные давления соответственно сухого воздуха и водяного пара.

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

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

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

7.2. Основные характеристики влажного воздуха

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

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

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} \approx \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} \cdot 100 \approx \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}} \cdot 100. \quad (7.2)$$

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

Относительная влажность может быть найдена с помощью психрометрических таблиц или $i-d$ диаграммы по показаниям прибора, называемого *психрометром*. Он состоит из двух термометров, один из которых сухой, а другой обернут влажной тканью (мокрый). Показания мокрого термометра в ненасыщенном воздухе ($\varphi < 1$) окажутся ниже, поскольку с него будет испаряться влага, что потребует затрат теплоты.

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

$$d = 622 \cdot \frac{p_{\text{п}}}{B - p_{\text{п}}} = 622 \cdot \frac{\varphi p_{\text{н}}}{B - \varphi p_{\text{н}}}, \quad \frac{\text{г}}{\text{кг с. в.}} \quad (7.3)$$

Значение относительной влажности φ в выражении (6.3) указывается в долях ($\varphi = 0 \dots 1$); значения $p_{\text{н}}$ и B – в любых одинаковых единицах измерения, поскольку они взаимно сокращаются.

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

$$d_{\text{max}} = 622 \cdot \frac{p_{\text{н}}}{B - p_{\text{н}}}, \quad \frac{\text{г}}{\text{кг с. в.}} \quad (7.4)$$

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

Газовая постоянная влажного воздуха $R_{\text{вл.в.}}$ (Дж/кг·°C):

$$R_{\text{вл.в.}} = \frac{8314}{\mu_{\text{вл.в.}}} = \frac{8314}{28,95 - 10,934 \cdot \varphi \cdot \frac{p_{\text{н}}}{B}} \quad (7.5)$$

Значение φ в выражении (6.5) указывается в долях ($\varphi = 0 \dots 1$).

Объем влажного воздуха $V_{\text{вл.в.}}$ ($\text{м}^3/\text{кг с.в.}$), приходящегося на 1 кг сухого воздуха:

$$V_{\text{вл.в.}} = \frac{R_{\text{вл.в.}} \cdot T}{B}, \quad (7.6)$$

где

$R_{\text{вл.в.}}$ – газовая постоянная влажного воздуха ($\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$);

T – температура влажного воздуха (К);

B – атмосферное давление (Па).

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

$$i_{\text{вл.в.}} = 1,0048 \cdot t + \frac{d}{1000} \cdot (2500 + 1,96 \cdot t), \quad (7.7)$$

где

d – влагосодержание ($\text{г}/\text{кг с.в.}$);

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

7.3. Применение таблиц для водяного пара в исследованиях влажного воздуха

Рассмотрим таблицу «*Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения*» (рис. 7.1). Она используется при исследованиях насыщенного влажного воздуха.

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температуре) [1]

Таблица 1

t_s	P_s	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
°С	бар	м ³ /кг	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)	кДж/(кг·К)
0	0,006108	0,0010002	206,32	-0,04	2501,0	2501,0	-0,0002	9,1565
0,01	0,006112	0,0010002	206,20	0,000614	2501,0	2501,0	0,0000	9,1560
1	0,006566	0,0010002	192,61	4,17	2502,8	2498,6	0,0152	9,1298
2	0,007054	0,0010001	179,94	8,39	2504,7	2496,3	0,0306	9,1035
3	0,007575	0,0010001	168,17	12,60	2506,5	2493,9	0,0459	9,0773
4	0,008129	0,0010000	157,27	16,80	2508,3	2491,5	0,0611	9,0514
5	0,008718	0,0010000	147,17	21,01	2510,2	2489,2	0,0762	9,0258
6	0,009346	0,0010000	137,768	25,21	2512,0	2486,8	0,0913	9,0003
7	0,010012	0,0010001	129,061	29,41	2513,9	2484,5	0,1063	8,9751
8	0,010721	0,0010001	120,952	33,60	2515,7	2482,1	0,1213	8,9501
9	0,011473	0,0010002	113,423	37,80	2517,5	2479,7	0,1362	8,9254
10	0,012271	0,0010003	106,419	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9009
11	0,013118	0,0010003	99,896	46,19	2521,2	2475,0	0,1658	8,8766
12	0,014015	0,0010004	93,828	50,38	2523,0	2472,6	0,1805	8,8525
13	0,014967	0,0010006	88,165	54,57	2524,9	2470,2	0,1952	8,8286
14	0,015974	0,0010007	82,893	58,75	2526,7	2467,9	0,2098	8,8050
15	0,017041	0,0010008	77,970	62,94	2528,6	2465,7	0,2243	8,7815
16	0,018170	0,0010010	73,376	67,13	2530,4	2463,3	0,2388	8,7583
17	0,019364	0,0010012	69,087	71,31	2532,2	2460,9	0,2533	8,7353

Рисунок 7.1 – Фрагмент таблицы «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температуре)»

Например, в насыщенном влажном воздухе ($\varphi = 1$) температурой $t = 17$ °С парциальное давление насыщенного пара $p_n = 0,019364$ бар = 1936 Па, его удельный объем $v'' = 69,087$ м³/кг, абсолютная влажность (плотность) $\rho_{п} = 1 / 69,087$ м³/кг = 14,5 г/м³. Это означает, что при данных условиях в 1 м³ насыщенного влажного воздуха содержится 14,5 г пара (влаги).

Для определения параметров пара в ненасыщенном воздухе ($\varphi < 1$) пользуются таблицей «Термодинамические свойства воды и перегретого пара» (рис. 7.2). Ее структура несколько отличается от рассмотренной ранее таблицы. Значения, характеризующие свойства перегретого пара, располагаются под горизонтальными линиями, а значения, характеризующие свойства воды – над горизонтальными линиями.

t	$p = 0,01 \text{ бар}$			$p = 0,02 \text{ бар}$			$p = 0,03 \text{ бар}$			$p = 0,04 \text{ бар}$		
	v	h	s									
$^{\circ}\text{C}$	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\text{кДж}/\text{кг}$	$\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$									
0	0,00102	0,0	-0,001	0,001	0,0	-0,0010	0,001	0,0	-0,0001	0,0010	0,0	-0,0001
10	130,60	2519,5	8,995	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510	0,0010002	42,0	0,1510
20	135,23	2538,1	9,060	67,58	2537,8	8,7396	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
40	144,47	2575,5	9,1837	72,21	2575,3	8,8632	48,13	2575,0	8,6755	36,08	2574,8	8,5421
80	162,95	2650,6	9,4093	81,46	2650,4	9,0891	54,30	2650,3	8,9016	40,72	2650,2	8,7685
120	181,42	2726,2	9,6122	90,70	2726,1	9,2921	60,46	2726,0	9,1048	45,34	2726,0	8,9718
160	199,89	2802,6	9,7971	99,94	2802,5	9,4771	66,62	2802,4	9,2898	49,96	2802,4	9,1570
200	218,3	2879,7	9,9674	109,17	2879,7	9,6475	72,78	2879,6	9,4603	54,58	2879,6	9,3274
240	236,8	2957,7	10,1257	118,40	2957,7	9,8058	78,93	2957,7	9,6186	59,20	2957,6	9,4858
280	255,3	3036,7	10,2739	127,64	3036,7	9,9539	85,09	3036,6	9,7668	63,81	3036,6	9,6340
320	273,7	3116,6	10,4134	136,87	3116,6	10,0934	91,24	3116,6	9,9063	68,43	3116,6	9,7735
360	292,2	3197,5	10,5454	146,10	3197,5	10,2255	97,40	3197,5	10,0383	73,05	3197,5	9,9055
400	310,7	3279,5	10,6709	155,33	3279,5	10,351	103,55	3279,5	10,164	77,66	3279,5	10,001
440	329,1	3362,4	10,790	164,56	3362,4	10,470	109,70	3362,4	10,283	82,28	3362,4	10,150
480	347,6	3446,5	10,905	173,8	3446,5	10,585	115,86	3446,5	10,398	86,89	3446,5	10,265
520	366,0	3531,7	11,015	183,0	3531,7	10,695	122,01	3531,6	10,508	91,51	3531,6	10,375
560	384,50	3618,0	11,121	192,2	3617,9	10,802	128,17	3617,9	10,614	96,12	3617,9	10,482
600	402,96	3705,3	11,224	201,5	3705,3	10,904	134,32	3705,3	10,717	100,74	3705,3	10,584

Рисунок 7.2 – Фрагмент таблицы «Термодинамические свойства воды и перегретого пара»

Поскольку значения давления и температуры даются с определенным шагом, для получения необходимых данных следует пользоваться методом интерполяции.

7.4 Использование $i-d$ диаграммы для влажного воздуха

Для расчетов, связанных с влажным воздухом, широко применяется $i-d$ диаграмма, один из вариантов которой представлен на рисунке 7.3. Особенностью диаграммы является то, что она построена в системе координат с углом между осями 135° , поэтому линии постоянной энтальпии на диаграмме располагаются под углом 45° .

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

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

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

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

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

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

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

Например:

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

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

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

Процесс С-Е является охлаждением воздуха от 46 до 22°C , при этом точке Е соответствует температура точки росы $t_p = 22^\circ\text{C}$. При дальнейшем охлажде-

нии воздух будет оставаться насыщенным, а его влагосодержание будет снижаться (процесс протекает по линии $\varphi = 100\%$). Таким образом можно уменьшить количество исходной влаги в воздухе, что широко применяется, например, в процессах кондиционирования воздуха.

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

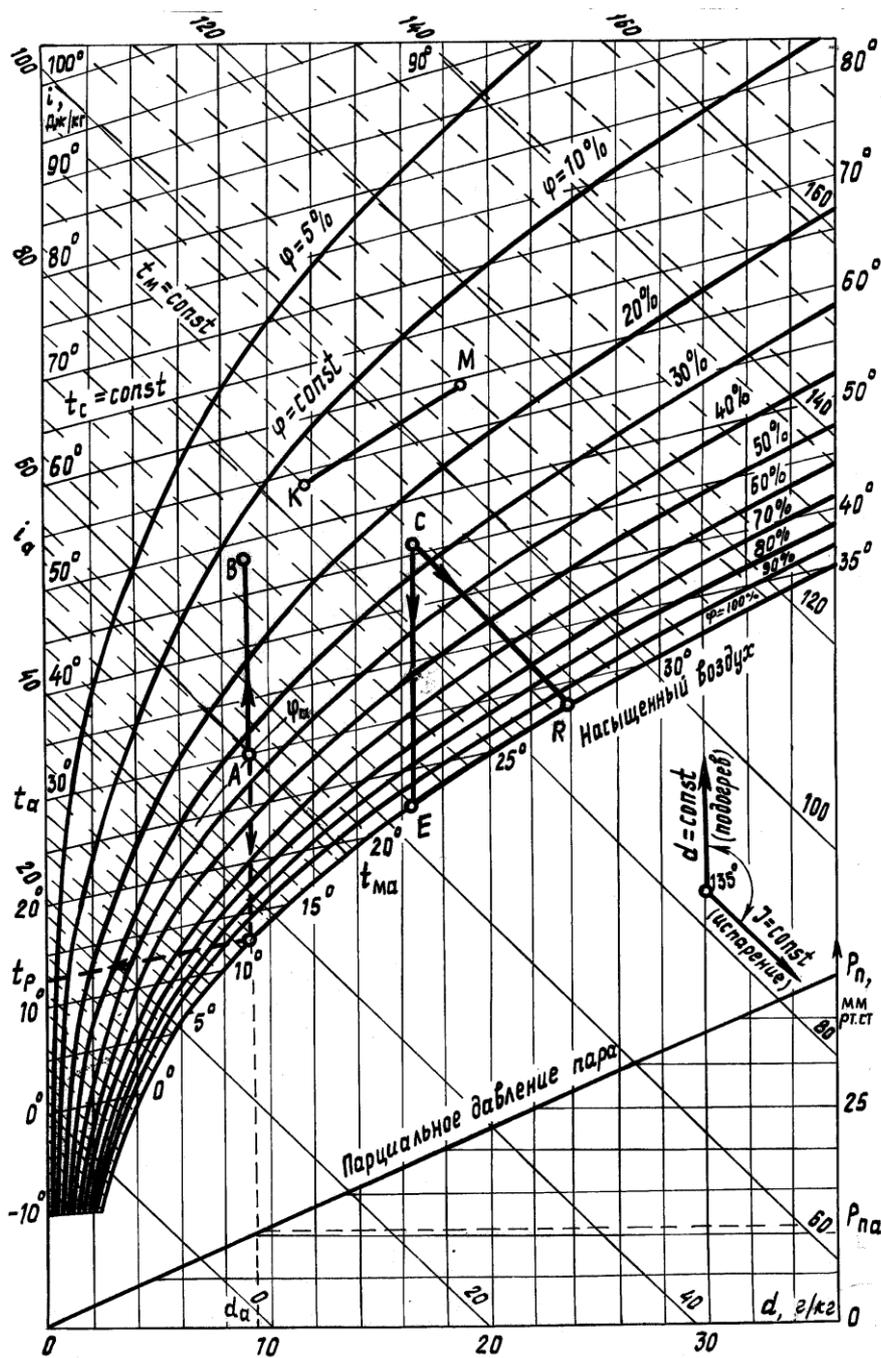


Рисунок 7.3 – Диаграмма $i-d$ влажного воздуха

ЛЕКЦИЯ 8 – ХОЛОДИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

8.1. Общие сведения

Роль искусственного холода значительна. Процесс его получения осуществляется с помощью холодильных установок. В них реализуется обратный цикл, в котором за счет подводимой к рабочему телу энергии (работы или теплоты) теплота отводится от холодного источника (охлаждаемого объема) и отдается в среду с более высокой температурой – как правило, в окружающее пространство.

В зависимости от принципа действия холодильные установки делятся на компрессорные, парожеткторные и абсорбционные.

Наибольшее распространение получили паровые компрессорные холодильные установки. В них для производства холода в цикле затрачивается работа на сжатие рабочего тела в компрессоре. В качестве рабочего тела (холодильного агента или хладагента) используются пары жидкостей с низкой температурой кипения (NH_3 , CO_2 , различные фреоны). В таблице указаны значения давления насыщения (кипения) различных хладагентов.

Таблица 8.1 – Давление насыщения различных хладагентов

Температура, °С	Давление насыщения, бар			
	аммиак (NH_3)	углекислый газ (CO_2)	фреон-12 (CF_2Cl_2)	фреон-22 (CHF_2Cl)
-40	0,716	10,05	0,642	1,06
-30	1,191	14,85	1	1,64
-20	1,9	19,6	1,51	2,46
-10	2,9	26,4	2,2	3,55
0	4,3	34,6	3,09	4,98

Например, при атмосферном давлении (≈ 1 бар) фреон-12 закипает при температуре -30 °С, фреон-22 – при температуре ≈ -40 °С, аммиак – при температуре ≈ -34 °С, тогда как вода при том же давлении закипает при температуре ≈ 100 °С. При увеличении давления температура кипения повышается.

8.2. Принципиальная схема и принцип работы паровой компрессорной холодильной установки

Ниже на рисунке представлена принципиальная схема паровой компрессорной холодильной установки.

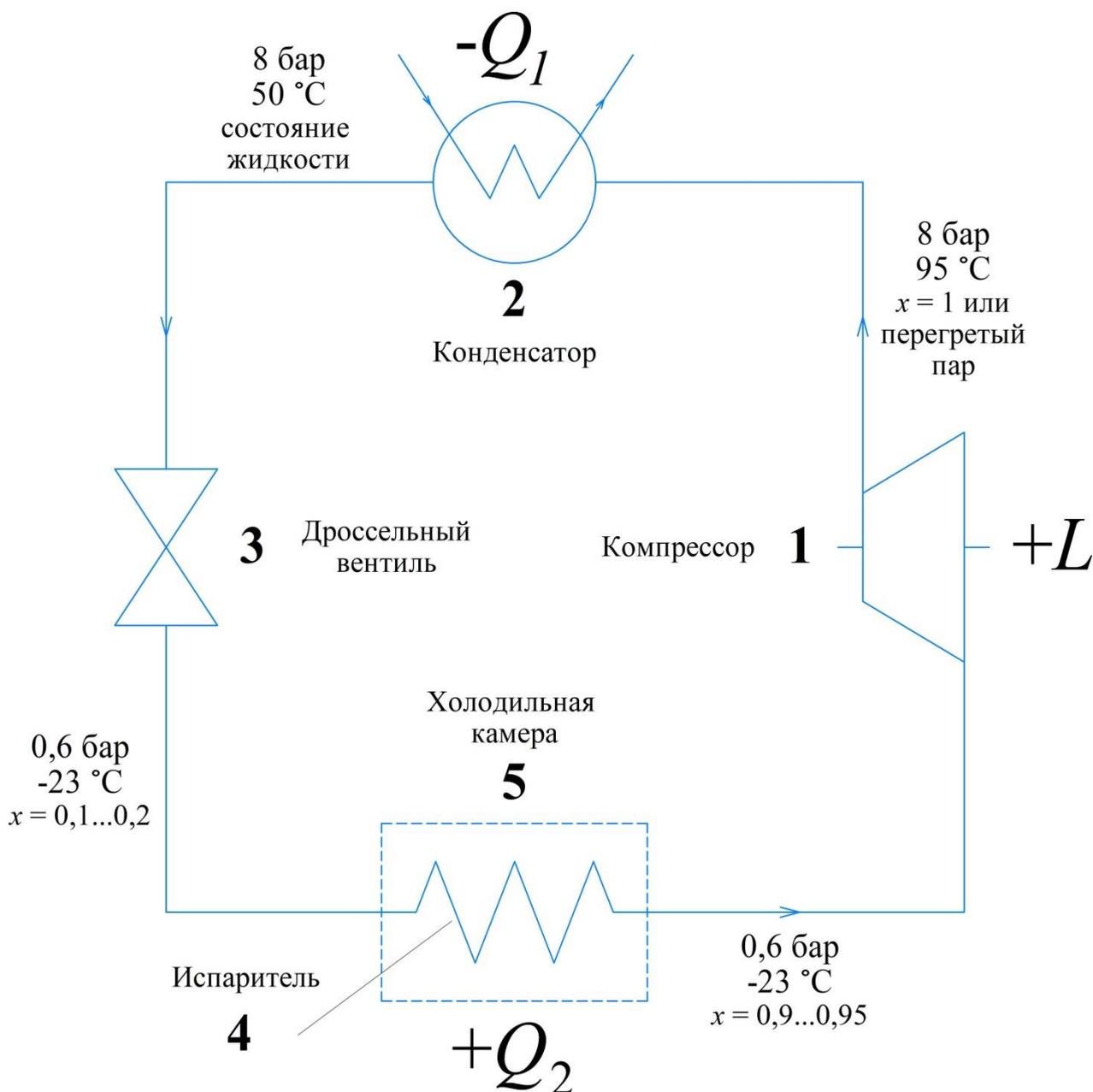


Рисунок 8.1 – Принципиальная схема паровой компрессорной установки

Установка работает следующим образом:

1) В компрессоре влажный пар хладагента сжимается, в результате чего получается сухой насыщенный или перегретый пар с более высоким давлением и температурой. При этом затрачивается работа L .

2) Из компрессора через клапан B полученный пар с параметрами $p \approx 8$ бар и $t \approx 95$ °С поступает в конденсатор (теплообменник), где он охлаждается (отдает в окружающую среду теплоту Q_1) и превращается в жидкость (конденсат).

3) Жидкий хладагент ($p \approx 8$ бар и $t \approx 50$ °С) проходит через дроссель, его температура и давление понижаются, и он закипает, превращаясь во влажный пар небольшой степени сухости $x \approx 0,1...0,2$ (в виде тумана). Температура этого пара оказывается ниже, чем температура охлаждаемого объема (холодильной камеры).

4) Полученный влажный пар ($p \approx 8$ бар и $t \approx -23$ °С) направляется в испаритель, находящийся в холодильной камере. Поскольку температура хладагента ниже температуры охлаждаемого объема, теплота Q_2 отводится от последнего (он охлаждается) и передается хладагенту, степень сухости которого повышается до значений $x \approx 0,9...0,95$ при неизменной температуре. Далее этот пар поступает в компрессор, и цикл работы холодильной установки повторяется.

Показателем энергетической эффективности холодильных установок служит холодильный коэффициент ε :

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{L}, \quad (8.1)$$

где

Q_2 – количество теплоты, полученное рабочим телом (хладагентом) от охлаждаемого объема за цикл, т.е. это количество теплоты, которое отведено от менее нагретого тела (охлаждаемого объема) и передано более нагретому телу (окружающей среде). Данный параметр называется *удельной холодопроизводительностью* или *холодильным эффектом*);

L – внешняя работа, затрачиваемая на сжатие рабочего тела за цикл.

$$L = Q_1 - Q_2, \quad (8.2)$$

где Q_1 – количество теплоты, отданное рабочим телом окружающей среде через конденсатор за цикл.

Таким образом, если открыть холодильник в помещении, температура в нем повысится, поскольку холодильник будет забирать теплоту Q_2 из окружающей среды и возвращать ей через конденсатор количество теплоты $Q_1 = Q_2 + L$.

8.3. Тепловой насос

Тепловым насосом (или трансформатором теплоты) называется холодильная установка, с помощью которой можно передавать энергию от тела с низкой температурой к телу с более высокой температурой.

По существу тепловым насосом является любая холодильная установка, которая используется не для выработки холода, а для получения теплоты.

В качестве источника теплоты может использоваться теплота грунта, водоемов, термальных вод, сточных вод.

Эффективность работы теплового насоса оценивается коэффициентом преобразования (отопительным коэффициентом) ψ – "пси", который представляет собой отношение количества теплоты Q_1 , сообщенной нагреваемому объекту, к работе L , затраченной в цикле (например, на сжатие хладагента в компрессоре), т.е.:

$$\psi = \frac{Q_1}{L}, \quad (8.3)$$

Учитывая, что $\varepsilon = Q_2/L$ и $Q_1 = Q_2 + L$, получаем:

$$\psi = \varepsilon + 1. \quad (8.4)$$

Таким образом, чем выше холодильный коэффициент ε , тем выше и коэффициент трансформации ψ . Для реальных тепловых насосов, как правило, $\psi = 3...4$. Таким образом, при использовании тепловых насосов потребитель получает в 3...4 раза больше теплоты по сравнению с затратами энергии на осуществление рабочего цикла теплового насоса.

В тех случаях, когда попеременно требуется охлаждение (летом) и нагрев (зимой), целесообразно совмещать холодильную установку и тепловой насос.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амерханов Р.А., Драганов Б.Х. Теплотехника: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М., 2006. 432 с.: ил.
2. Кузнецов Ю.В., Никифоров А.Г. Теплотехника: учеб. для вузов. Смоленск: ФГБОУ ВО Смоленская ГСХА, 2021. 278 с.: ил.
3. Михайличенко С.М., Купреенко А.И., Исаев Х.М. Теплотехника. Примеры решения задач: методическое пособие по выполнению практических и самостоятельных работ по дисциплине «Теплотехника и теплоснабжение предприятий пищевых производств». Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2022. 134 с.
4. Никифоров А.Г., Попова Д.Ю. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания: учеб.-метод. пособие по теплотехнике. Смоленск: Изд-во Смоленской ГСХА, 2017. 75 с.
5. Рудобашта С.П. Теплотехника. М.: КолосС, 2010. 599 с.: ил. (Учебники и учеб. пособия для студентов высш. учеб. заведений).
6. Чащинов В.И. Практикум по теплотехнике: учеб. пособие для студентов агроинженерных специальностей. Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2009. 86 с.
7. Чащинов В.И. Теплотехника: учеб. пособие для студентов, обучающихся по направлениям подготовки для предприятий переработки сельскохозяйственной продукции, пищевых производств и предприятий общественного питания. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2015. 220 с.

Учебное издание

Михайличенко Станислав Михайлович

Купреенко Алексей Иванович

Исаев Хафиз Мубариз - оглы

Т Е П Л О Т Е Х Н И К А

Курс лекций

Часть I – ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Учебно-методическое пособие

Редактор Осипова Е.Н.

Подписано к печати 14.09.2022 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.

Бумага офсетная. Усл. п. л. 3,37. Тираж 25 экз. Изд. № 7355.

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