Теплотехника

Техническая термодинамика и теплопередача

Овсянников М.К., Орлова Е.Г.,
Костылев И.И.

ФГБОУ ГУМРФ

Овсянников Михаил Константинович
доктор технических наук, профессор;
Орлова Елена Геннадьевна
кандидат технических наук, доцент;
Костылев Иван Иванович
доктор технических наук, профессор
кафедры
«Теплотехника, судовые котлы и вспомогательные установки»
«ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»

Курс «Техническая термодинамика и теплопередача» предназначен для подготовки инженеров по специальности 180405 «Эксплуатация судовых энергетических установок»

Основными задачами данного курса являются:

- овладение знаниями об основных законах термодинамики и теплопередачи; характеристиках рабочих сред, теоретических циклах тепловых двигателей и холодильных установок
- приобретение навыков выполнения теплотехнических расчётов и моделирования термодинамических процессов.

Курс «Техническая термодинамика и теплопередача» направлен на формирование следующих компетенций в соответствии с ФГОС ВПО:

— способность и готовность осуществлять выбор оборудования, элементов и систем оборудования для замены в процессе эксплуатации судов (ПК-9);

— способность применять базовые знания фундаментальных и профессиональных дисциплин, осуществлять управление качеством изделий, продукции и услуг, проводить технико-экономический анализ в области профессиональной деятельности, обосновывать принимаемые решения по технической эксплуатации судового оборудования, уметь решать на их основе практические задачи профессиональной деятельности (ПК-15);

Компетенции в соответствии с ФГОС ВПО:

— способность и готовность принять участие в разработке проектной, нормативной, эксплуатационной и технологической документации для объектов профессиональной деятельности (ПК-24);

— способность участвовать в фундаментальных и прикладных исследованиях в области судов и судового оборудования (ПК-30);

— способность создавать теоретические модели, позволяющие прогнозировать свойства объектов профессиональной деятельности (ПК-31);

— способность разрабатывать планы, программы и методики проведения исследований объектов профессиональной деятельности (ПК-32);

— способность осуществлять и анализировать результаты исследований, разрабатывать предложения по их внедрению (ПК-34).

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ

РАЗДЕЛ I. ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Глава 1. ГАЗ КАК РАБОЧЕЕ ТЕЛО. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ

Глава 2. ФУНКЦИИ СОСТОЯНИЯ. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Глава 3. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Глава 4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Глава 5. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ДВС, ГТУ, КОМПРЕССОРОВ

Глава 6. РЕАЛЬНЫЙ ГАЗ. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Глава 7. ЦИКЛЫ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Оглавление

Глава 8. ТЕЧЕНИЕ УПРУГОЙ СРЕДЫ

Глава 9. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Глава 10. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

РАЗДЕЛ II. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Глава 11.ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Глава 12. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Глава 13. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Глава 14. ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Глава 15. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Приложения

Глава 1. ГАЗ КАК РАБОЧЕЕ ТЕЛО. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ

1.1. Идеальный газ. Параметры состояния

1.2. Уравнение состояния (Клайперона—Менделеева)

1.3. Термодинамический процесс. Графическое изображение процесса

1.4. Теплоемкость

1.5. Внешняя работа изменения объема

Контрольные вопросы и задания к главе 1.

Глава 2. ФУНКЦИИ СОСТОЯНИЯ. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

2.1. Функции состояния газа

- **2.1.1. Внутренняя энергия**
- **2.1.2. Энтальпия**
- **2.1.3. Энтропия**

2.2. Первый закон термодинамики

Контрольные вопросы и задания к главе 2

Глава 3.
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

3.1. Политропный процесс
3.2. Уравнения характерных термодинамических процессов
3.3. Внешняя работа изменения объема газа в политропном процессе
3.4. Политропный процесс в диаграмме *T — s*

Контрольные вопросы и задания к главе 3

Глава 4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

4.1. Термодинамический цикл. Тепловой двигатель.

4.2. Второй закон термодинамики.

4.3. Цикл Карно

4.4. Эквивалентный и приведенный циклы Карно

4.5. Теорема Карно

4.6. Второй закон термодинамики для необратимых процессов

Контрольные вопросы и задания к главе 4

Глава 5. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ДВС, ГТУ, КОМПРЕССОРОВ

5.1. Двигатель внутреннего сгорания с циклом Карно
5.2. Теоретические циклы ДВС с различными условиями подвода теплоты
5.3. Коэффициенты полезного действия теплового двигателя
5.4. Газотурбинная установка
5.5. Компрессоры
5.6. Многоступенчатый поршневой компрессор
Контрольные вопросы и задания к главе 5

Глава 6. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ДВС, ГТУ, КОМПРЕССОРОВ

6.1. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Пограничные кривые агрегатных состояний
6.2. Термодинамические свойства воды и водяного пара
Контрольные вопросы и задания к главе 6

Глава 7. ЦИКЛЫ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

7.1. Паротурбинная установка. Цикл Ренкина
7.2. Влияние параметров пара на КПД цикла Ренкина
7.3. Цикл Ренкина с промежуточным перегревом пара
7.4. Цикл Ренкина с регенерацией тепла
7.5. Паротурбинная установка с циклом Карно

Контрольные вопросы и задания к главе 7

Глава 8. ТЕЧЕНИЕ УПРУГОЙ СРЕДЫ

8.1. Первый закон термодинамики для потока упругой (сжимаемой) среды
8.2. Скорость распространения звука в упругой среде Числа M и λ
8.3. Движение газа в прямом канале переменного сечения
8.4. Зависимость скорости истечения газа от перепада давления
8.5. Критическая скорость истечения. Сопло Лаваля
8.6. Расход газа при истечении из резервуара
8.7. Истечение несжимаемой жидкости
8.8. Необратимое течение упругой жидкости
8.9. Дросселирование
Контрольные вопросы и задания к главе 8

Глава 9. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

9.1. Обратный цикл Карно
9.2. Цикл компрессорной паровой холодильной установки
9.3. Рабочие тела холодильных установок

Контрольные вопросы и задания к главе 9

Глава 10. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

10.1. Термодинамические характеристики газовых смесей

10.2. Атмосферный воздух как газовая смесь

10.3. Способы определения относительной влажности. Диаграмма *i — d*

10.4. Термодинамические процессы при кондиционировании атмосферного воздуха

Контрольные вопросы и задания к главе 10

РАЗДЕЛ II. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА
Глава 11.ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

11.1. Температурное поле и температурный градиент
11.2. Тепловой поток. Основной закон теплопроводности
11.3. Коэффициент теплопроводности
11.4. Дифференциальное уравнение теплопроводности
11.5. Условия однозначности (краевые условия) задач теплопроводности
11.6. Способы задания граничных условий теплообмена

11.7. Стационарная теплопроводность через однослойную плоскую стенку.
11.8. Стационарная теплопроводность через многослойную плоскую стенку
11.9. Теплопроводность через цилиндрическую стенку
11.10. Сравнение теплопроводности цилиндрической и плоской стенок
11.13. Теплопроводность через многослойную цилиндрическую стенку
11.14. Теплопроводность в стержне постоянного поперечного сечения
11.15. Нестационарная теплопроводность. Понятие о регулярном режиме
Контрольные вопросы и задания к главе 11

Глава 12. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

12.1. Понятия и определения

12.2 Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена

12.3. Основы теории подобия

12.4. Числа гидромеханического подобия

12.5. Числа теплового подобия

12.6. Критериальные уравнения конвективного теплообмена

12.7. Теплообмен в свободном потоке жидкости (естественная конвекция)

12.8. Теплообмен в вынужденном потоке жидкости (вынужденная конвекция)

- 12.8.1. Режимы движения вязкой жидкости
- 12.8.2. Понятие пограничного слоя

12.8.3. Осреднение параметров потока

12.8.4. Теплоотдача в каналах при ламинарном режиме движения жидкости

12.8.5. Теплоотдача в каналах при турбулентном режиме движения жидкости

12.8.6. Теплоотдача при поперечном омывании гладких труб

12.8.7. Теплоотдача при поперечном омывании пучков труб

12.8.8. Теплоотдача при движении жидкости вдоль плоской стенки

12.9. Конвективный теплообмен при изменении агрегатного состояния

Контрольные вопросы и задания к главе 12

Глава 13. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

13.1. Теплопередача от среды к среде через многослойную плоскую стенку
13.2. Эквивалентная стенка
13.3. Теплопередача через цилиндрическую стенку. Термическое сопротивление теплопередаче
13.4. Понятие о критической толщине изоляции
Контрольные вопросы и задания к главе 13

Глава 14. ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН

14.1. Определения
14.2. Основные законы теплового излучения
14.3. Излучение газов
14.4. Излучение между твердыми телами.
Контрольные вопросы и задания к главе 14

Глава 15. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

15.1. Определения
15.2. Основы расчета рекуперативного теплообменника
15.3. Теплообменники с органическим теплоносителем
15.4. Особенности расчета теплообмена в установках с термомаслом

Контрольные вопросы и задания к главе 15

Приложения

1. Задачи. Решения
2. Таблицы теплофизических свойств жидкостей, газов и твердых тел

Часть 1

Техническая термодинамика

ФГБОУ ГУМРФ

Условные обозначения

Раздел I. Техническая термодинамика

U, Дж — внутренняя энергия;
u, Дж/кг — удельная внутренняя энергия;
I, Дж — энтальпия;
i, Дж/кг — удельная энтальпия;
S, Дж/К — энтропия;
s, Дж/(кг·К) — удельная энтропия;
Q, Дж — теплота;
q, Дж/кг — удельная теплота;
c, Дж/(кг·К) — удельная массовая теплоемкость;

Условные обозначения

c_p; c_v — удельная массовая теплоемкость газа в изобарном и изохорном процессах соответственно;

T, К — температура по шкале Кельвина;

t, °С — температура по шкале Цельсия;

L, Дж — работа;

ℓ, Дж/кг — удельная работа;

η_t — термодинамический (термический) коэффициент полезного действия;

N, Вт — мощность теплового двигателя;

p, Па = Н/м² — давление;

r, Дж/кг — удельная скрытая теплота парообразования;

V, м³ — абсолютный объем;

Условные обозначения

υ, м^3/кг — удельный объем;

ρ, кг/м^3 — плотность;

τ, с — время;

R_o, Дж/(кмоль · К) — универсальная газовая постоянная;

R, Дж/(кг·К) — массовая газовая постоянная для конкретного газа;

μ, кг/кмоль — молекулярная масса;

k — показатель адиабаты;

n — показатель политропы;

m, кг — масса;

G, кг/с — массовый расход;

w, м/с — скорость.

Первая часть курса «Техническая термодинамика» содержит общие сведения о параметрах, характеристиках и теплофизических свойствах рабочих сред судовых энергетических установок (в том числе газовых смесей и двухфазных смесей) и способах их определения; изложение основных законов технической термодинамики; сведения о термодинамических циклах тепловых двигателей и холодильных установок и оценке их эффективности:

Глава 1.
ГАЗ КАК РАБОЧЕЕ ТЕЛО. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ

1.1. Идеальный газ. Параметры состояния

Идеальным газом принято называть модель газа, в которой:

а) общий объем *предельно упакованных молекул* весьма мал по сравнению с объемом, занимаемым газом;

б) силы взаимного притяжения и отталкивания между молекулами отсутствуют (кроме соударений)

К идеальным газам относятся одно- и двухатомные газы.

Параметры состояния

Состояние любого газа характеризуется **тремя основными параметрами**:

1. **Удельный объем** υ, м^3/кг; $\upsilon = V/m$,
   где m – масса газа, кг; V – объем, м^3.
   Величина обратная удельному объему, называется плотностью:
   $\rho = 1/\upsilon$, кг/м^3.
2. **Давление** p, Па = Н/м^2 = кг/(м·с^2).
3. **Температура** T, К; $T = t + 273{,}15$,

где t, ^{o}С – температура по шкале Цельсия.

Давление

1 бар = 10^5 Па;

1 атм ≈ 101325 Па;

1 МПа = 10^6 Па;

1 ат = 1 кгс/см² ≈ 98067 Па;

750 мм рт. ст. = 10^5 Па;

10 м вод. ст.≈ 10^5 Па.

1 атм ≈10 м вод. ст.≈ 10^5 Па= 1 бар= =750 мм рт. ст.

1.2. Уравнение состояния (Клайперона – Менделеева)

Если во всех точках объема параметры занимающего его газа соответственно одинаковы, состояние газа называется ***равновесным****.*

$$pV = \frac{m}{\mu} R_0 T$$

где μ, кг/(кмоль) – молекулярная масса газа.

Величина R_o = 8314 Дж/(кмоль · К) называется *универсальной газовой постоянной,* которая для всех газов одинакова.

Формы записи уравнения состояния

$$pv = \frac{R_0}{\mu} T$$

$R = \frac{R_0}{\mu}$ Дж/(кг ·К) - «массовая газовая постоянная»

Или: $pv = RT$

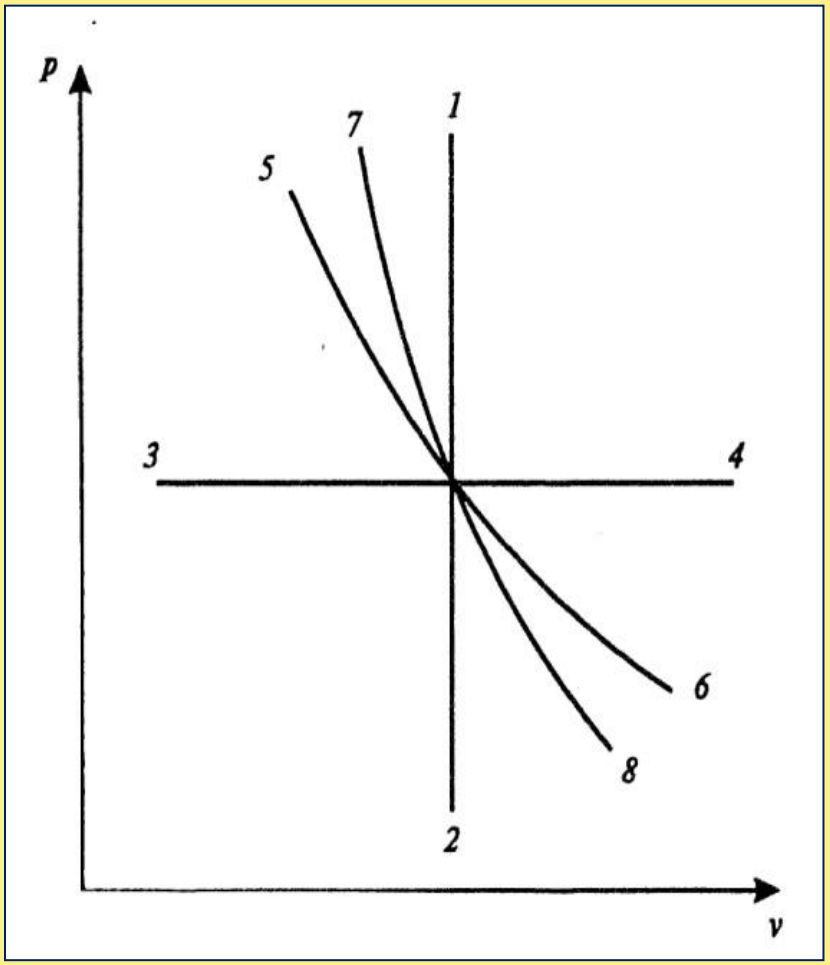
Или : $pV = mRT$

1.3. Термодинамический процесс. Графическое изображение процесса

- Непрерывная совокупность изменяющихся состояний рабочего тела называется *термодинамическим процессом*.
- Если каждое из указанных состояний равновесно, процесс называется *обратимым*.

Процессы со специальными признаками

1. **Изохорный**, при неизменном объеме (υ = const, 1→2);
2. **Изобарный**, при неизменном давлении (p = const, 3→4);
3. **Изотермный** (изотермический), при неизменной температуре (T = const, 5→6);
4. **Адиабатный**, без теплообмена между газом и окружающей средой (7→8).



1.4. Теплоемкость

Количество теплоты, необходимое для изменения температуры 1 кг вещества на 1 К, называется его *удельной массовой теплоемкостью* **c**, Дж/(кг · К)

$$c = \frac{dq}{dT}$$

$$q_{1\to 2} = \int_{T_1}^{T_2} c\,dT$$

Если $c=const$, то

$$q = c \cdot \Delta T$$

$$Q = c \cdot \Delta T \cdot m$$

Удельную массовую теплоемкость в изобарном процессе обозначим c_p, в изохорном процессе – c_v.

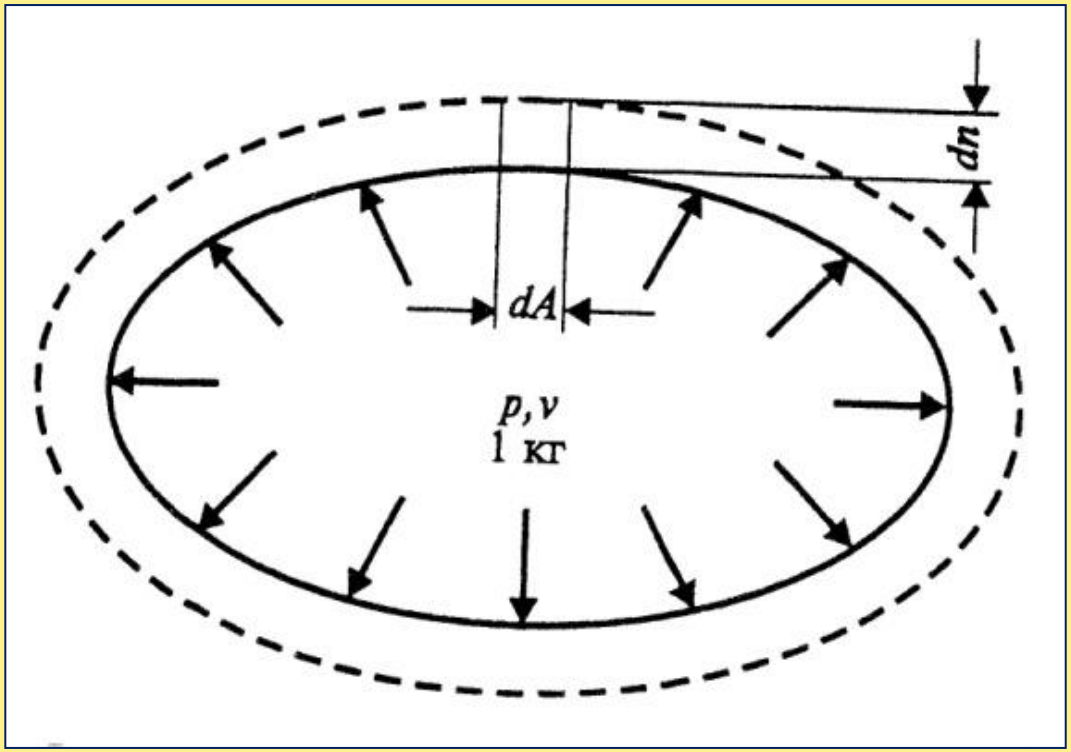
$$c_p - c_v = R$$

Зависимость изобарной теплоемкости воздуха от давления и температуры

Давление, температура	Теплоемкость c_p, кДж/(кг · К),			
p, бар	1	60	140	220
$t = 0\ ^0C$	1,004	1,114	1,248	1,317
$t = 250\ ^0C$	1,025	1,047	1,076	1,097

1.5. Внешняя работа изменения объема

При изменении удельного объема совершается механическая работа по перемещению поверхности рабочего тела под действием сил давления



Удельная работа расширения газа, находящегося под давлением p при элементарном изменении объема ($d\upsilon = Adn$):

$$dl = \int_{(A)} (pdA)dn = p\int_{(A)} dAdn = pd\upsilon, \text{ (Дж/кг)}$$

Для произвольного количества рабочего тела элементарная работа $dL = pdV$, (Дж).

Для произвольного процесса, переводящего газ из состояния 1 в состояние 2:

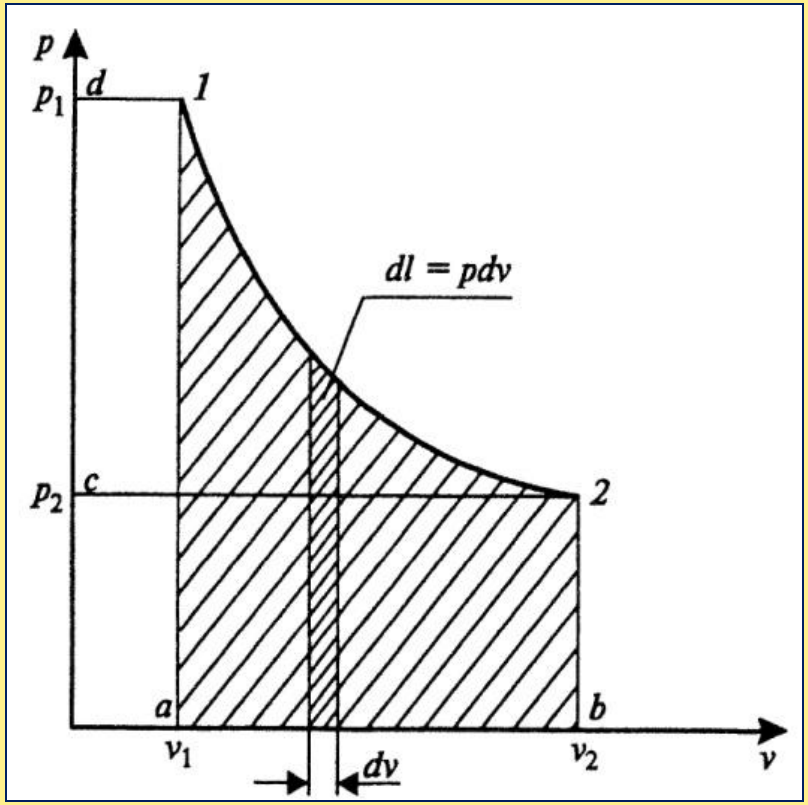
$$l_{1\to 2} = \int_1^2 pd\upsilon \qquad L_{1\to 2} = \int_1^2 pdV$$

Графическое изображение работы по изменению объёма

В изобарном процессе ($p = \text{const}$):

$$l_{\substack{p \\ 1\to 2}} = p\int_1^2 d\upsilon = p(\upsilon_2 - \upsilon_1)$$

$$L_{\substack{p \\ 1\to 2}} = p(V_2 - V_1) = mp(\upsilon_2 - \upsilon_1)$$



Контрольные вопросы и задания к главе 1

1. Какие основные проблемы рассматриваются в технической термодинамике?
2. Какое состояние называется равновесным состоянием газа?
3. Назвать основные термодинамические параметры равновесного состояния газа, их размерности.
4. Какой газ называется идеальным газом?
5. Какая существует связь между абсолютным и манометрическим давлением?
6. Какие температурные шкалы можно встретить в технической литературе?
7. Что называется абсолютной температурой?

8. Что называется уравнением состояния газа?
9. Написать уравнение состояния идеального газа.
10. Какая величина называется удельной массовой газовой постоянной?
11. Как связаны универсальная и массовая газовые постоянные?
12. Что называется термодинамическим процессом?
13. Назвать характерные термодинамические процессы и их признаки.
14. Что называется теплоемкостью?
15. Назвать размерности теплоемкости газа.
16. Определить различие изобарной и изохорной теплоемкостей.
17. Как определяется работа изменения объема газа?

Глава 2.
ФУНКЦИИ СОСТОЯНИЯ. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

2.1. Функции состояния газа

Функция состояния — это функция, зависящая от нескольких независимых параметров, однозначно определяющих состояние системы.

Состояние газа характеризуется тремя параметрами состояния и тремя функциями состояния:

внутренней энергией (*u*), энтальпией (*i*) и энтропией (*s*).

Функции состояния

Дифференциал некоторой функции $Z = Z(x,y)$:

$$dZ = \frac{\partial Z(x,y)}{\partial x}dx + \frac{\partial Z(x,y)}{\partial y}dy = Mdx + Ndy$$

является полным дифференциалом, если $\left.\frac{\partial M}{\partial y}\right|_x = \left.\frac{\partial N}{\partial x}\right|_y$

Если дифференциал некоторой термодинамической функции полный, то сама функция является функцией состояния.

Значение функции состояния зависит только от параметров состояния и не зависит от способа перехода системы из одного состояния в другое.

2.1.1. Внутренняя энергия

Под ***внутренней энергией газа*** понимается суммарная энергия движения его частиц.

Она пропорциональна температуре газа T. Удельная внутренняя энергия u, Дж/кг (отнесенная к 1 кг массы газа):

$u = c_v T$, её изменение : $du = c_v\, dT$

Внутренняя энергия U, Дж (для m кг газа):

$U = mc_v T$, её изменение : $dU = mc_v\, dT.$

Если $c_v = const$, то $\Delta u = c_v\, \Delta T$ и $\Delta U = mc_v\, \Delta T.$

2.1.2. Энтальпия

Энтальпией называется полная энергия не перемещающегося газа, которая складывается из внутренней энергии и энергии упругого сжатого объема (pV) :

$I = U + pV$, Дж;

удельной энтальпией называется энтальпия одного килограмма газа i, Дж/кг, $\boldsymbol{i = u + pv}$.

Изменение этальпии: $di = c_p dT$

Если c_p = const, то

$$\Delta i_{1\to 2} = c_p \Delta T_{1\to 2}$$

2.1.3. Энтропия

Удельной энтропией называется функция состояния s (Дж/(кг·К), для которой :

$$\boxed{\frac{dq}{T} = ds}$$

С учётом 1-го закона термодинамики:

$$\frac{dq}{T} = \frac{c_v dT + p d\upsilon}{T} = \frac{c_v dT}{T} + \frac{R d\upsilon}{\upsilon}$$

так как $\left.\frac{1}{T}\frac{\partial c_\upsilon}{\partial \upsilon}\right|_T = 0$, $\left.\frac{1}{\upsilon}\frac{\partial R}{\partial T}\right|_\upsilon = 0$

Энтропия

Величина $\frac{dq}{T}$

является полным дифференциалом функции s, следовательно *s* является функцией состояния.

Энтропия произвольной массы газа $S = ms$, Дж/К.

Энтропию называют

мерой вероятности состояния термодинамической системы.

2.2. Первый закон термодинамики

Первым законом термодинамики называется закон сохранения энергии применительно к термодинамической системе.

Подведенная к рабочему телу теплота расходуется на изменение его внутренней энергии и производство внешней работы изменения объема.

Для 1 кг газа : $dq = du + dl = c_v dT + pdv$.

Контрольные вопросы и задания к главе 2

1. Что называется внутренней энергией газа, назвать ее размерность.
2. Что называется энтальпией газа?
3. Что называется функцией состояния газа?
4. Назвать признаки полноты дифференциала (функции состояния).
5. Что называется энтропией газа?
6. Определить физический смысл энтропии как функции состояния.
7. Сформулировать первый закон термодинамики.

Глава 3. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

3.1. Политропный процесс

Термодинамический процесс, единственным отличительным признаком которого является постоянство теплоемкости c_n, называется *политропным*.

Величина c_n, называется удельной теплоемкостью политропного процесса.

Уравнение политропного процесса

$$p\upsilon^{n} = \text{const}$$

$$n = \frac{c_n - c_p}{c_n - c_v}$$ - показатель политропного процесса

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}\right)^{n-1} \qquad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n} ; \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{n/(n-1)}$$

3.2. Уравнения характерных термодинамических процессов

- Изохорный
- Изобарный
- Изотермический

- $c_n = c_v$; $n = \infty$; $v = const$
- $c_n = c_p$; $n = 0$; $p = const$
- $n = 1$; $pv = const$

$$c_n = c_T = \frac{dq}{dT} = \infty$$

- Адиабатный

(где k – *показатель адиабаты*)

- $pv^k = const$

$$n = k = \frac{c_p}{c_\upsilon} \qquad c_n = c_s = \frac{dq}{dT} = 0$$

3.3. Работа изменения объема газа в политропном процессе

Удельная работа в политропном процессе:

$$l_{1\to 2} = \frac{1}{n-1}\left(p_1\upsilon_1 - p_2\upsilon_2\right) = \frac{p_1\upsilon_1}{n-1}\left(1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right) = \frac{R}{n-1}\left(T_1 - T_2\right)$$

Для изотермического процесса:

$$l_{1\to 2} = const\int_{\upsilon_1}^{\upsilon_2}\frac{d\upsilon}{\upsilon} = p_1\upsilon_1 \ln\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1} = p_1\upsilon_1 \ln\frac{p_1}{p_2}$$

Основные зависимости термодинамических процессов

Процесс и его уравнение	**p и v**	**v и T**	**p и T**	**l,** Дж/кг	**q,** Дж/кг	**Δs,** Дж/(кг · К)	**c_n,** Дж/(кг · К)
Изохорный $v = \text{const}$, $n = \pm\infty$	–	–	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$l = 0$	$q = \Delta u = c_v(T_2 - T_1)$	$\Delta s = c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$	$c_n = c_v$
Изобарный $p = \text{const}$, $n = 0$	–	$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$	–	$l = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1)$	$q = c_p(T_2 - T_1)$	$\Delta s = c_p \ln \frac{v_2}{v_1} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$	$c_n = c_p$
Изотермический $pv = \text{const}$, $T = \text{const}$, $n = 1$	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}$	–	–	$l = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} = q$	$q = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2}$	$\Delta s = R \ln \frac{p_1}{p_2} = R \ln \frac{v_2}{v_1}$	$c_n = c_T$ $c_T = \pm\infty$

Основные зависимости термодинамических процессов

Процесс и его уравнение	***p* и *υ***	***υ* и *T***	***p* и *T***	***l*, Дж/кг**	***q*, Дж/кг**	**Δ*s*, Дж/(кг · К)**	**c_n, Дж/(кг · К)**
Адиабатный $pv^n = \text{const}$, $s = \text{const}$, $n = k$	$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}\right)^k$	$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}\right)^{k-1}$	$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}$	$l = \frac{1}{k-1}(p_1\upsilon_1 - p_2\upsilon_2) = \frac{R}{k-1}(T_1 - T_2) = c_\upsilon(T_1 - T_2) = \frac{p_1\upsilon_1}{k-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]$	$q = 0$	$\Delta s = 0$	$c_n = 0$
Политропный; $pv^n = \text{const}$ ($c_n = \text{const}$)	$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}\right)^n$	$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}\right)^{n-1}$	$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}$	$l = \frac{p_1\upsilon_1 - p_2\upsilon_2}{n-1} = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{p_1\upsilon_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$	$q = c_n(T_2 - T_1) = c_\upsilon\frac{n-k}{n-1}(T_2 - T_1)$	$\Delta s = c_n \ln\frac{T_2}{T_1}$	$c_n = c_\upsilon\frac{n-k}{n-1}$

Контрольные вопросы и задания к главе 3

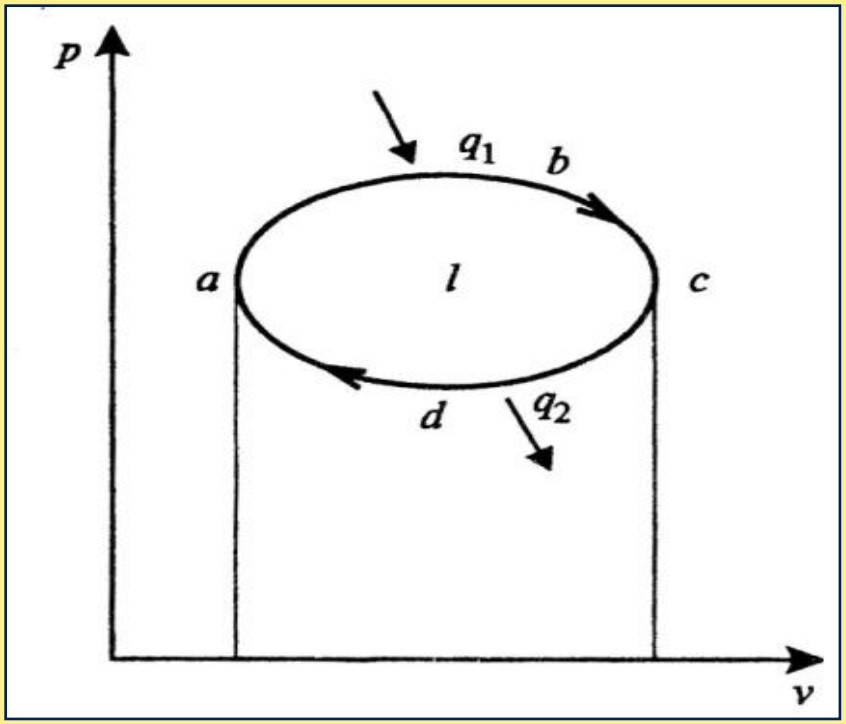
1. Какой процесс называется политропным?
2. Напишите уравнения политропного процесса.
3. Что называется показателем политропного процесса?
4. Как определяется работа изменения объема в политропном процессе?
5. Изобразите все характерные термодинамические процессы в осях $p–v$ и $T–s$.

Глава 4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

4.1. Термодинамический цикл. Тепловой двигатель. Понятие термодинамического КПД теплового двигателя.

Термодинамический цикл

- Непрерывная замкнутая совокупность термодинамических процессов образует термодинамический цикл.



На протяжении цикла 1 кг рабочего тела получает от теплоисточника теплоту в количестве q_1 и отдает теплоприемнику q_2 Дж/кг теплоты.

Тепловой двигатель.

- Устройство для многократного воспроизводства термодинамического цикла, в котором подводимая к рабочему телу теплота преобразуется в механическую работу, называется *тепловым двигателем*

Понятие термодинамического КПД

Отношение полезной механической работы цикла (l) к количеству подведенной к рабочему телу теплоты (q_1) называется *термическим коэффициентом полезного действия* (КПД) цикла теплового двигателя:

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

4.2. Второй закон термодинамики

Формулировки второго закона термодинамики :

1. *природа стремится к переходу от менее вероятных состояний к более вероятным*
2. *Теплота самопроизвольно может передаваться лишь от тела более нагретого к менее нагретому. Для передачи тепла в противоположном направлении необходимо затратить работу.*

4.3. Второй закон термодинамики для обратимого термодинамического цикла.

В результате совершения термодинамического цикла рабочее тело приходит в начальное состояние , и его энтропия в конце цикла принимает свое первоначальное значение, следовательно:

$$\oint ds = \oint \frac{dq}{T} = 0 \qquad (4.1)$$

Этот интеграл называется **интегралом Клаузиуса.**

Выражение (4.1) называется *математической формулировкой второго закона термодинамики.*

Для нулевого результата суммирования выражения (4.1) необходимо иметь как положительные, так и отрицательные слагаемые.

Другими словами, *для совершения полного термодинамического цикла теплового двигателя к рабочему телу нужно не только подводить теплоту от теплоисточника, но с такой же непреложностью и отводить теплоту в теплоприемник.*

Следовательно, с учётом выражения для КПД,

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1}$$

можно утверждать, что *термодинамический КПД земного теплового двигателя всегда меньше единицы.*
Другими словами, *вечный двигатель второго рода невозможен* (q_1 ограничено, $q_2 \neq 0$).

Это положение является следствием второго закона термодинамики.

4.4. Второй закон термодинамики для необратимых процессов.

- Согласно второму закону термодинамики *природа стремится к переходу от менее вероятных состояний к более вероятным.*
- различные формы энергии могут самопроизвольно переходить в теплоту, но невозможны обратные самопроизвольные превращения теплоты в другие виды энергии. Это отражено в другой формулировке второго закона: *любой реальный самопроизвольный процесс необратим.*

Второй закон термодинамики для необратимых процессов

Для обратимых циклов интеграл Клаузиса:

$$\oint ds = \oint \frac{dq}{T} = 0$$

Общая *математическая формула второго закона термодинамики:*

$$ds_{\substack{\text{необр} \\ \text{обр}}} \geq \frac{dq}{T}$$

Для обратимого процесса (знак =)
и для необратимого (знак >)

Второй закон термодинамики для необратимых процессов

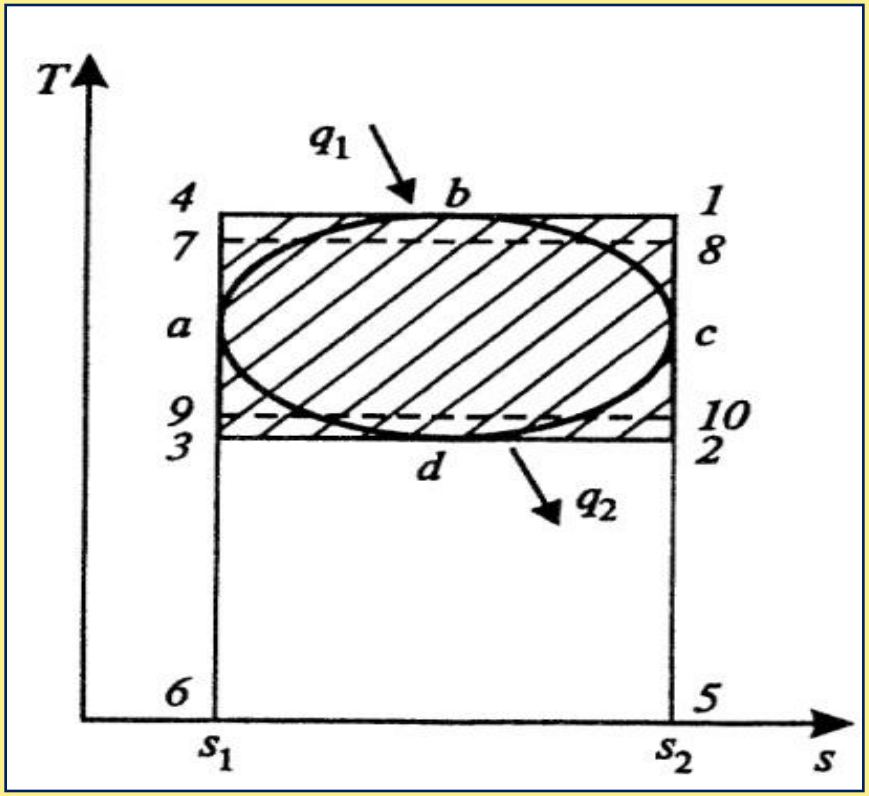
$$\oint_{\substack{\text{необр} \\ \text{обр}}} \frac{dq}{T} \leq 0$$

$$\boldsymbol{dS \geq 0}$$

- второй закон термодинамики часто называют *законом возрастания энтропии*

4.5. Цикл Карно

Рассмотрим цикл, состоящий из двух изотерм и двух адиабат



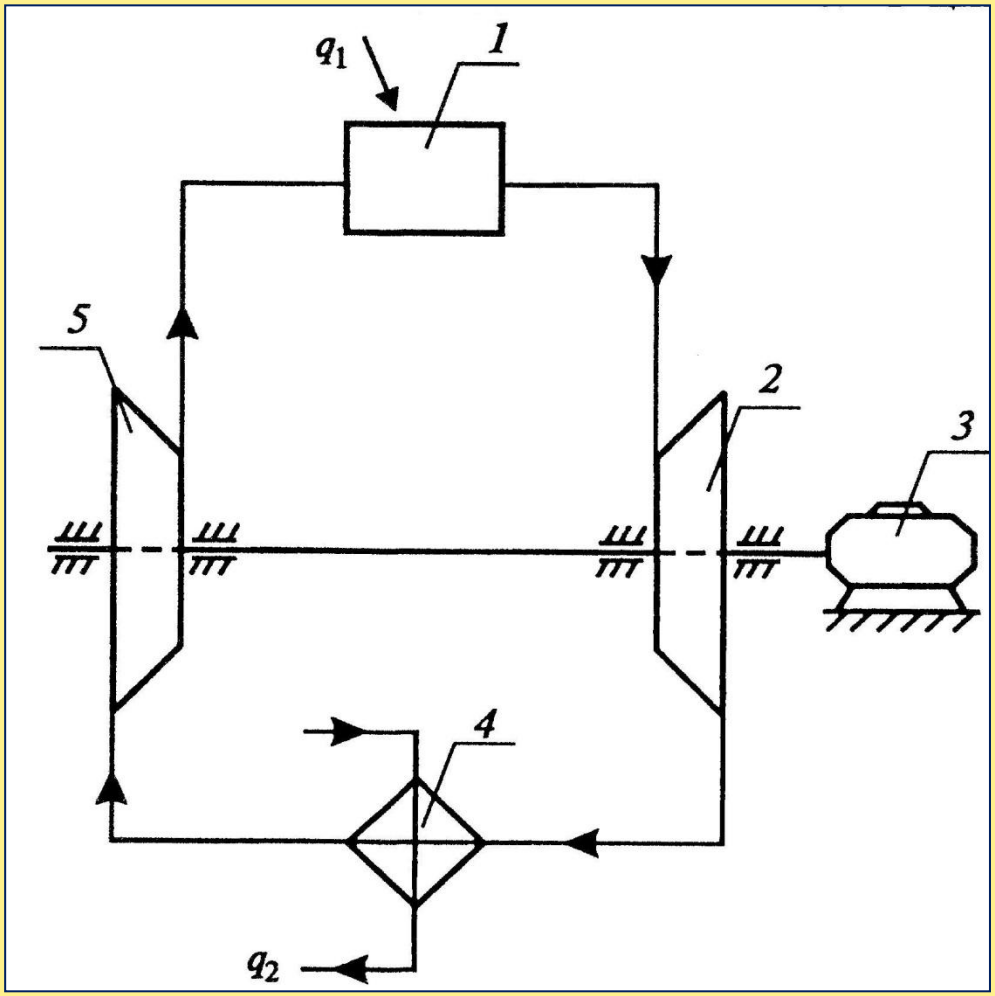
$$\eta_{tK} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

В любом другом цикле

$q_1 \le q_{1k}$ $q_2 \ge q_{2k}$

Цикл Карно имеет максимальный для данного диапазона изменения температуры термический КПД.

Схема теплового двигателя, работающего по циклу Карно



1 и 4 – теплообменники
2 – турбина
3- потребитель
5- компрессор

Теорема Карно:

КПД цикла Карно не зависит от свойств рабочего тела

Контрольные вопросы и задания к главе 4

1. Что называется термодинамическим циклом?
2. Что называется термодинамическим КПД теоретического цикла теплового двигателя?
3. Сформулировать второй закон термодинамики.
4. Какой цикл называется обратимым циклом Карно?
5. Определить выражение термического КПД обратимого цикла Карно.
6. От каких параметров зависит величина термического КПД обратимого цикла Карно?

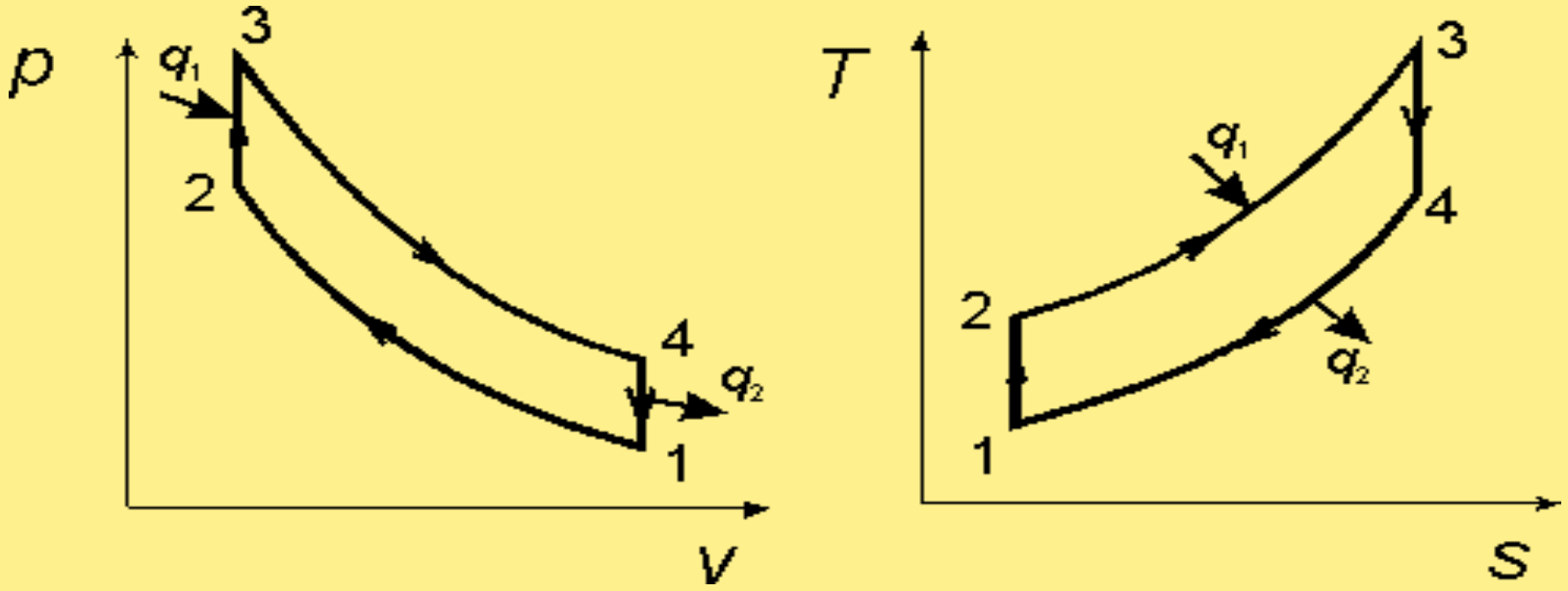
Контрольные вопросы и задания к главе 4

7. Почему обратимый цикл Карно считается образцовым?
8. Сформулировать теорему Карно.
9. Что называется интегралом Клаузиуса?
10. Определить различие в интегралах Клаузиуса для обратимого и необратимого термодинамических циклов (равенство и неравенство Клаузиуса).
11. Определить сущность второго закона термодинамики для необратимых процессов (закон возрастания энтропии).

Глава 5. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ДВС, ГТУ, КОМПРЕССОРОВ

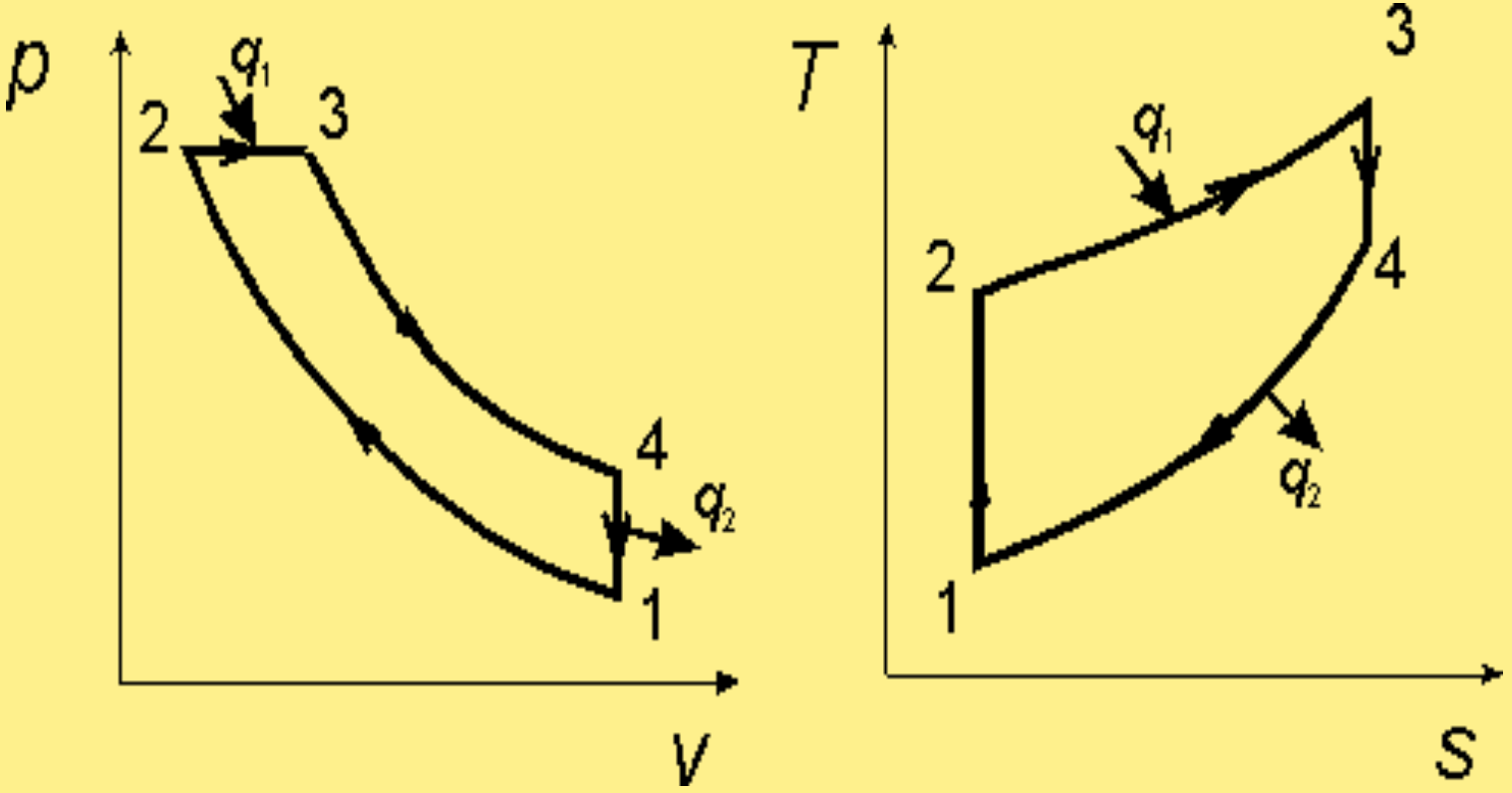
5.1. Теоретические циклы ДВС с различными условиями подвода теплоты

1. Цикл Отто



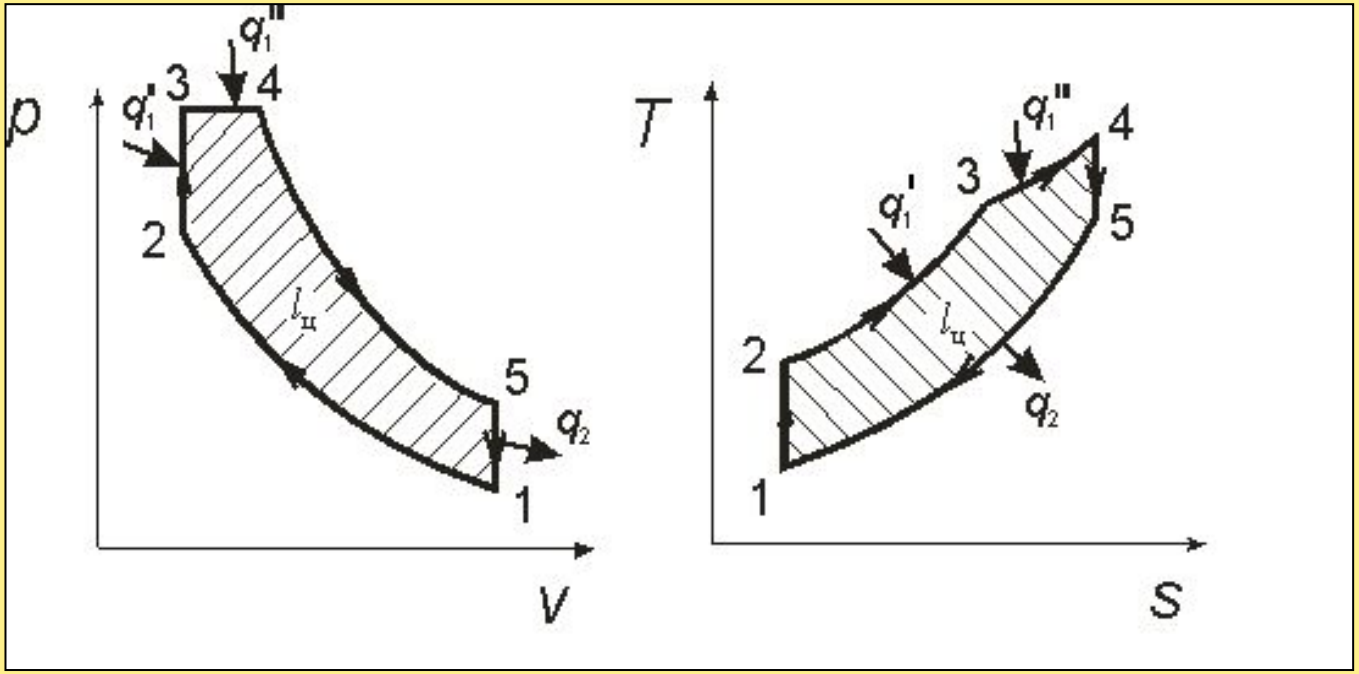
Теоретические циклы ДВС с различными условиями подвода теплоты

- 2. Цикл Дизеля



Теоретические циклы ДВС с различными условиями подвода теплоты

- 3. Цикл с комбинированным (смешанным) подводом теплоты



Характеристики циклов

- степень сжатия $\varepsilon = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}$
- степень повышения давления $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$
- степень предварительного расширения

$$\rho = \frac{\upsilon_4}{\upsilon_3}$$

- термический КПД цикла

$$\eta_{t\text{см}} = 1 - \frac{q_2}{q_1' + q_1''} = 1 - \frac{c_\upsilon\left(T_5 - T_1\right)}{c_\upsilon\left(T_3 - T_2\right) + c_p\left(T_4 - T_3\right)}$$

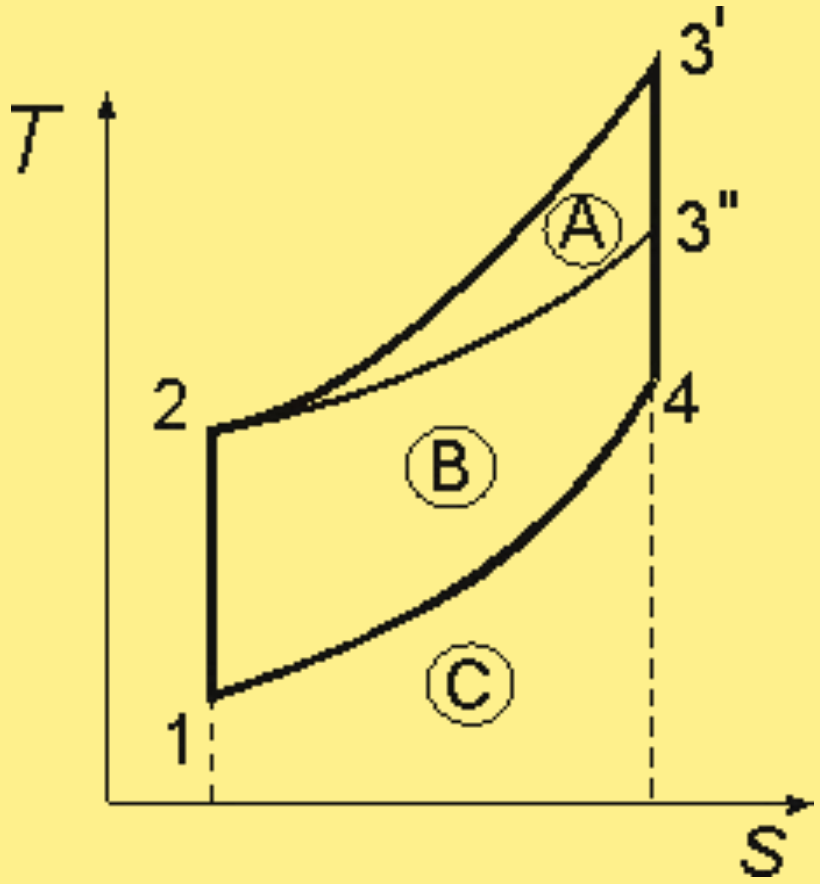
Термический КПД циклов ДВС

- Общая формула $$\eta_{t\text{см}} = 1 - \frac{\lambda\rho^{k} - 1}{\varepsilon^{k-1}\left[(\lambda - 1) + \lambda k(\rho - 1)\right]}$$

- в цикле Дизеля, $\lambda = 1$ $$\eta_{t\text{д}} = 1 - \frac{\rho^{k} - 1}{\varepsilon^{k-1} k(\rho - 1)}$$

- в цикле Отто, $\rho = 1$ $$\eta_{t\text{о}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

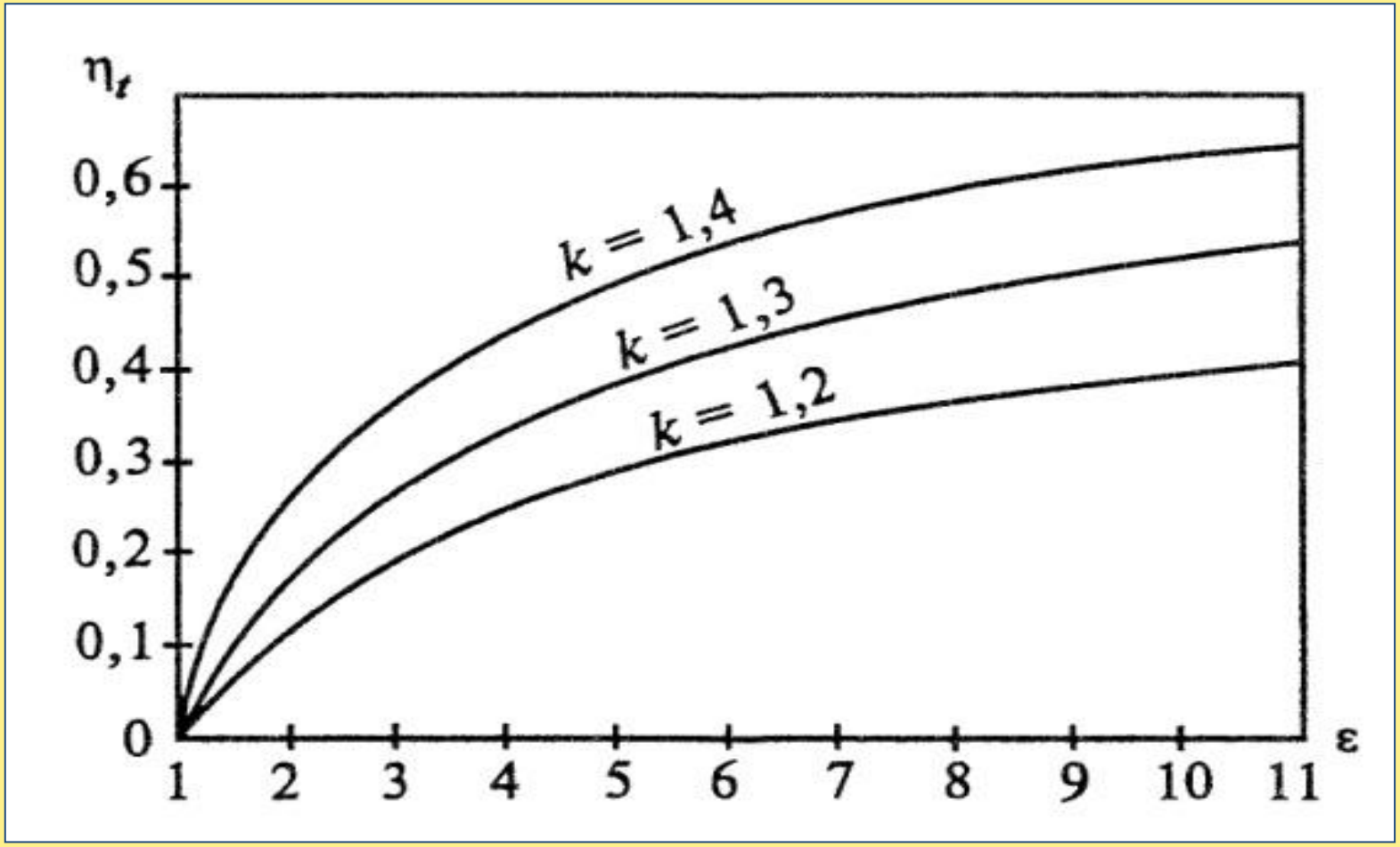
Сравнение циклов Отто (1-2-3'-4) и Дизеля (1-2-3"-4) при одинаковой степени сжатия



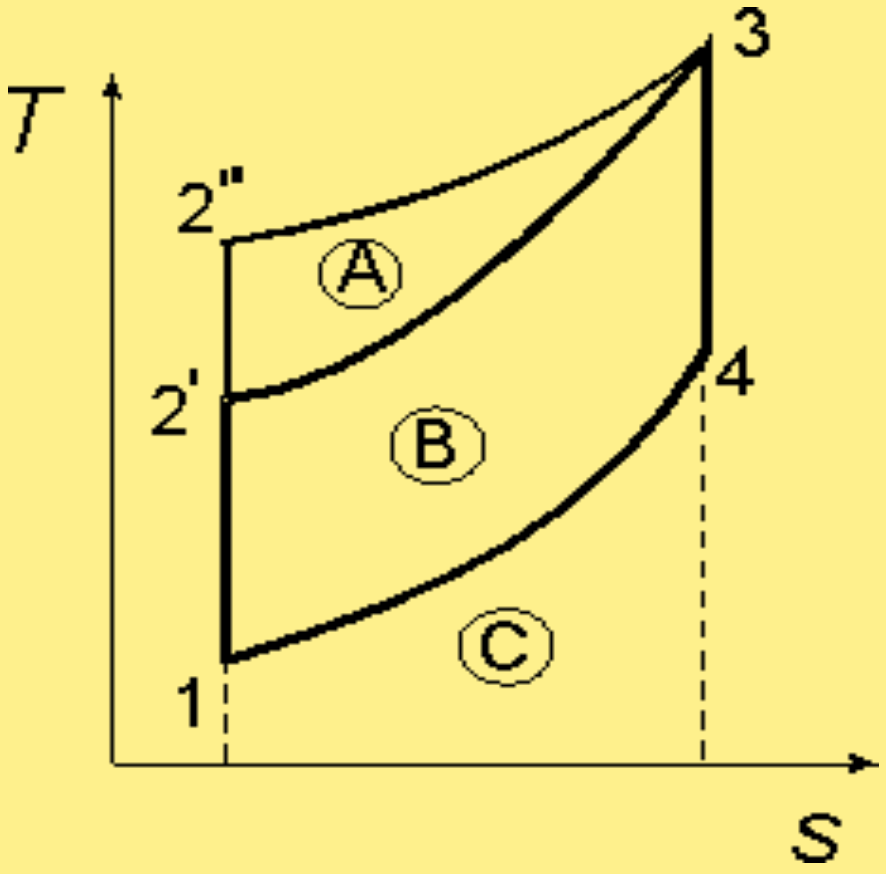
- $A = l_{1\text{-}2\text{-}3'4}$
- $B = l_{1\text{-}2\text{-}3''4}$
- $C = q_{отв}$

- $\eta_{to} > \eta_{tсм} > \eta_{tд}$

Зависимость термического КПД цикла Отто от степени сжатия и показателя адиабаты



Сравнение циклов Отто (1-2‘-3-4) и Дизеля (1-2"-3-4) в одинаковом температурном диапазоне



- $A=l_{1\text{-}2”\text{-}3\text{-}4’}$
- $B= l_{1\text{-}2”\text{-}3\text{-}4’}$
- $C=q_{отв}$

- $\eta_{tд} > \eta_{tсм} > \eta_{tо}$

5.2. Коэффициенты полезного действия теплового двигателя

- Относительный внутренний КПД теплового двигателя: $\eta_{oi} = l_{i}'/l_i$

где l_{i}', l_i – работа идеального и реального циклов теплового двигателя соответственно

- Индикаторный КПД

$$\eta_i = \frac{l_i}{q_1} = \frac{3600 P_i}{B_ч Q_н^р} = \frac{3600}{g_i Q_н^р}$$

где P_i – индикаторная (внутренняя) мощность теплового двигателя, кВт;
$B_ч$ – часовой расход топлива, кг/ч;

$Q_н^р$ – низшая рабочая теплотворная способность топлива, кДж/кг;
g_i – удельный индикаторный расход топлива, кг/(кВт · ч).

Коэффициенты полезного действия теплового двигателя

- механический КПД $$\eta_м = \frac{l_e}{l_i} = \frac{P_e}{P_i}$$

где l_e – работа цикла на валу, двигателя, Дж/(кг · цикл);
P_e – эффективная мощность на валу теплового двигателя, кВт;
P_i–индикаторная мощность теплового двигателя, кВт.

- эффективный КПД

$$\eta_e = \eta_м \eta_i = \eta_м \eta_{0i} \eta_t = \frac{3600 P_e}{B_ч Q_н^р} = \frac{3600}{g_e Q_н^р}$$

где $g_e = B_ч / P_e$ – удельный эффективный расход топлива, кг/(кВт · ч)

5.3. Газотурбинная установка

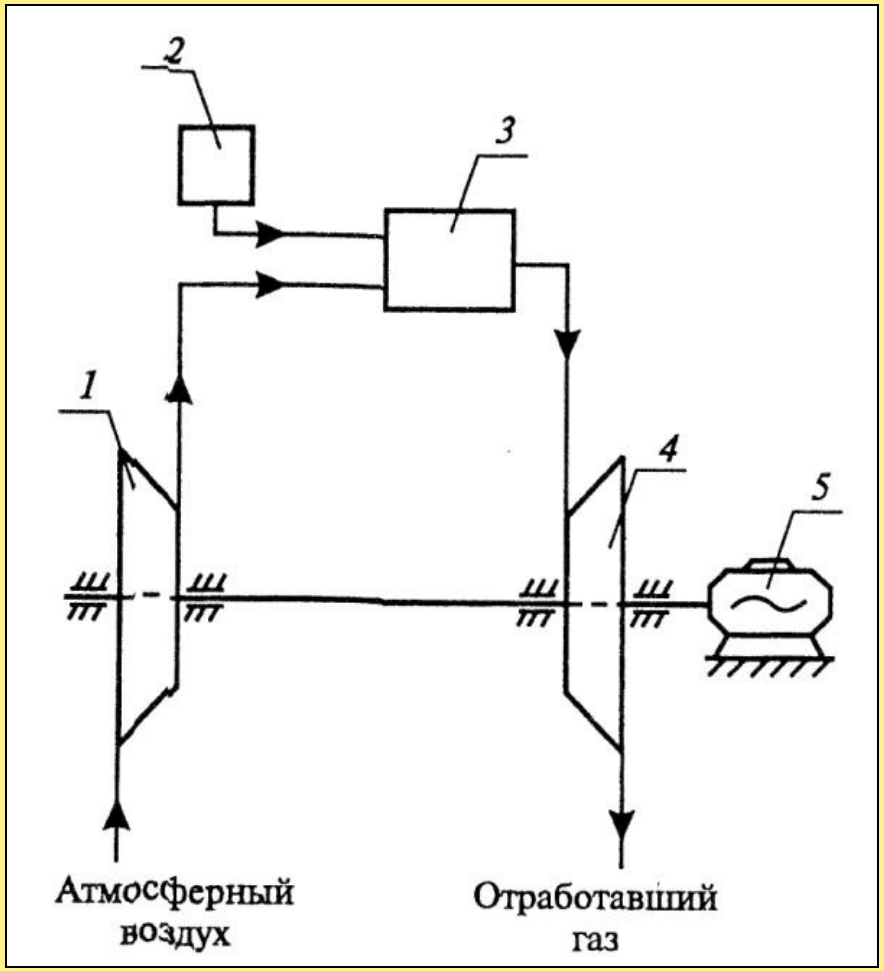
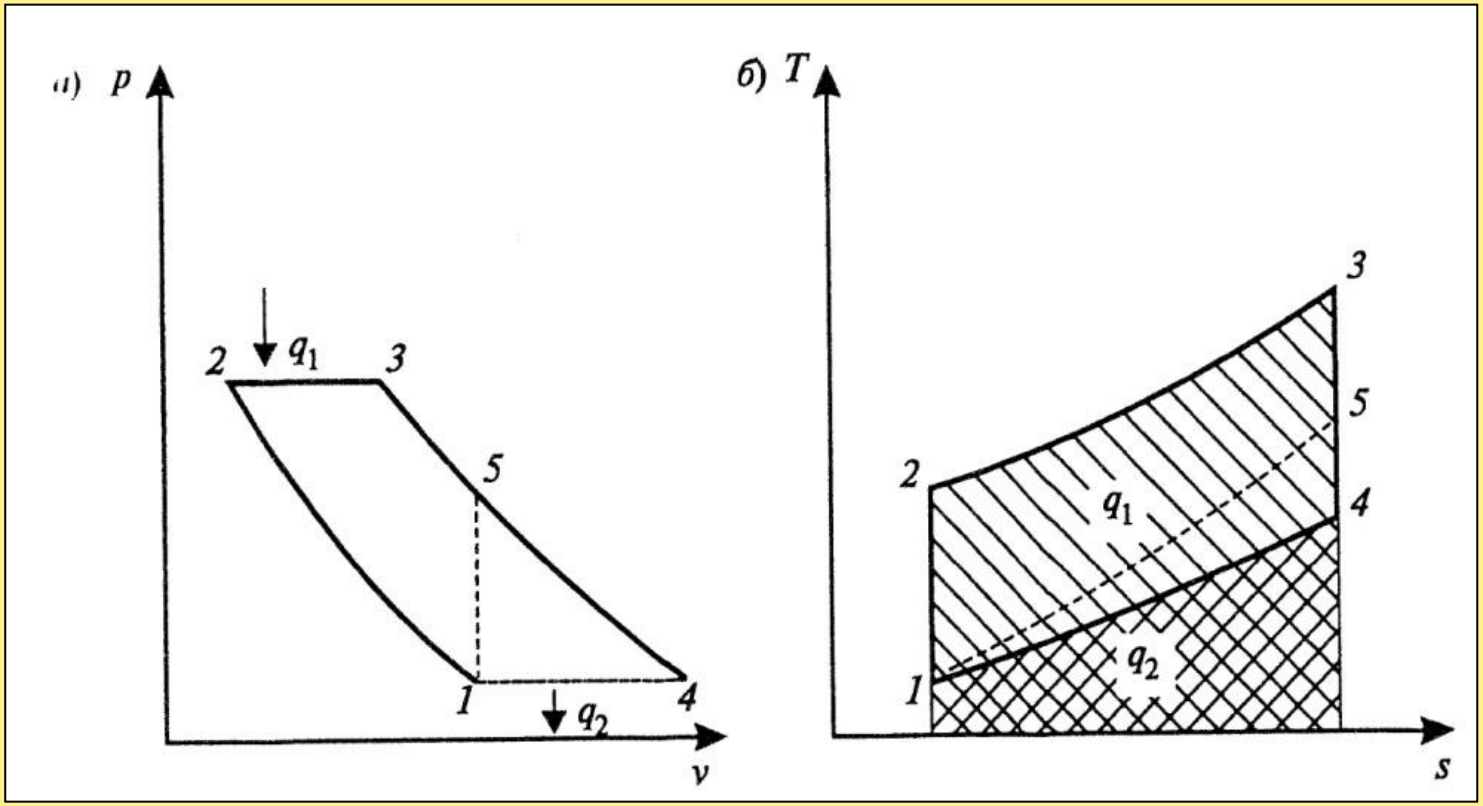


Схема газотурбинной установки с изобарным подводом теплоты

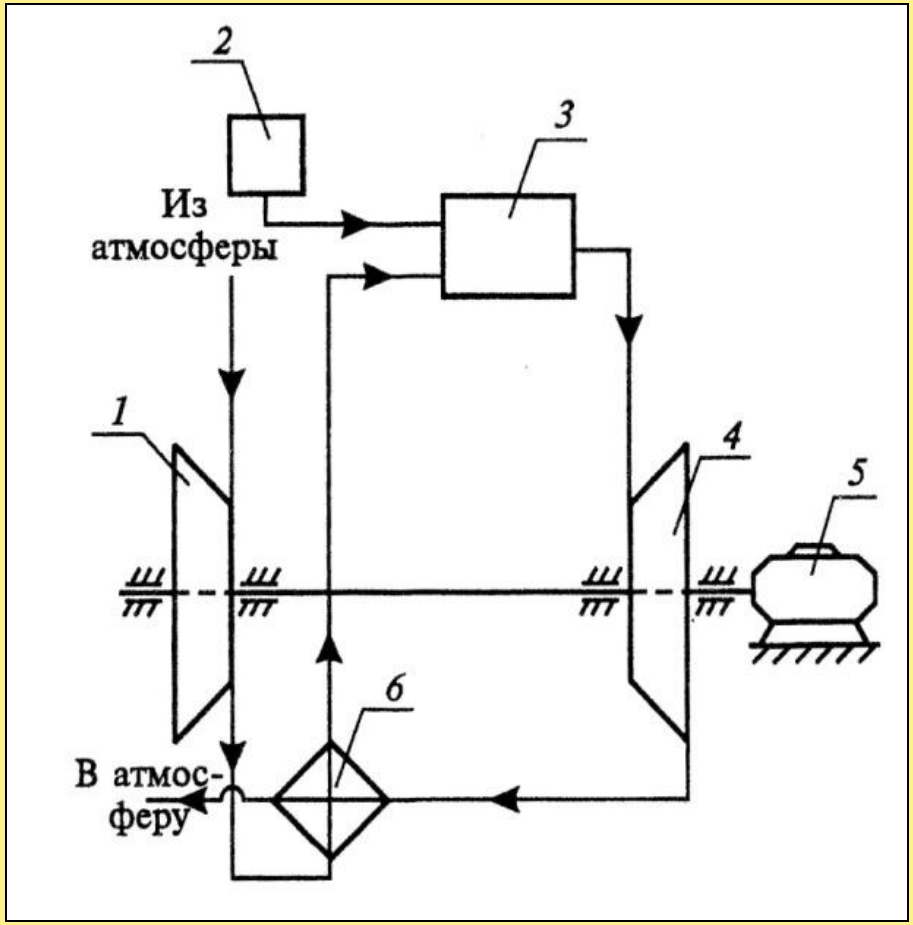
- Компрессор *1*
- топливный бак *2*
- камера горения *3*
- турбина *4*
- потребитель *5*

Цикл ГТУ



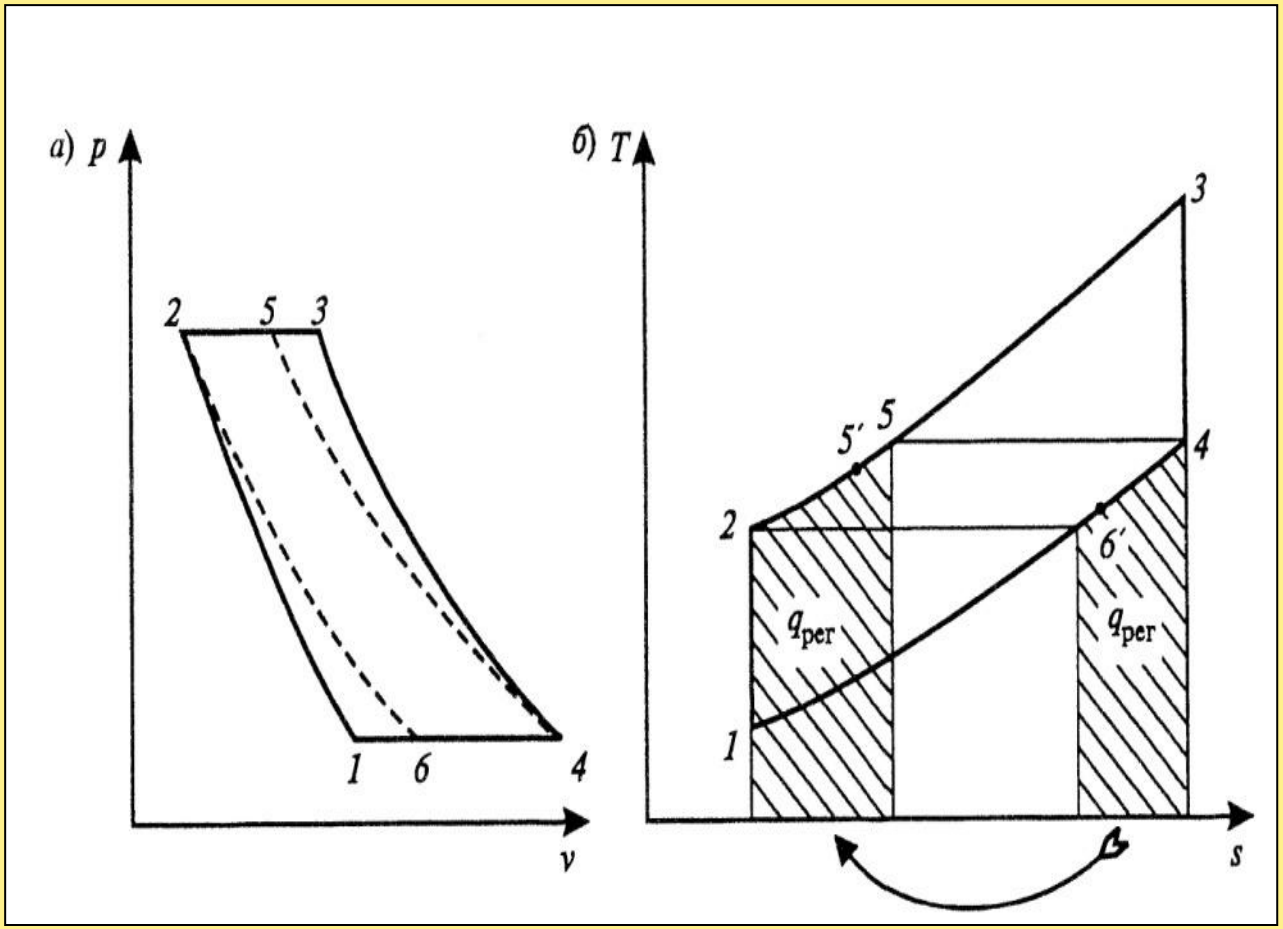
$$\eta_{t(\text{ГТУ})} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} \qquad \eta_{t(\text{ГТУ})} = 1 - \frac{1}{\pi^{(k-1)/k}} \qquad \pi = \frac{p_2}{p_1} = \varepsilon^k = \left(\frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}\right)^k$$

Схема газотурбинной установки с регенерацией отбросной теплоты



- Компрессор *1*
- топливный бак *2*
- камера горения *3*
- турбина *4*
- потребитель *5*
- регенератор *6*

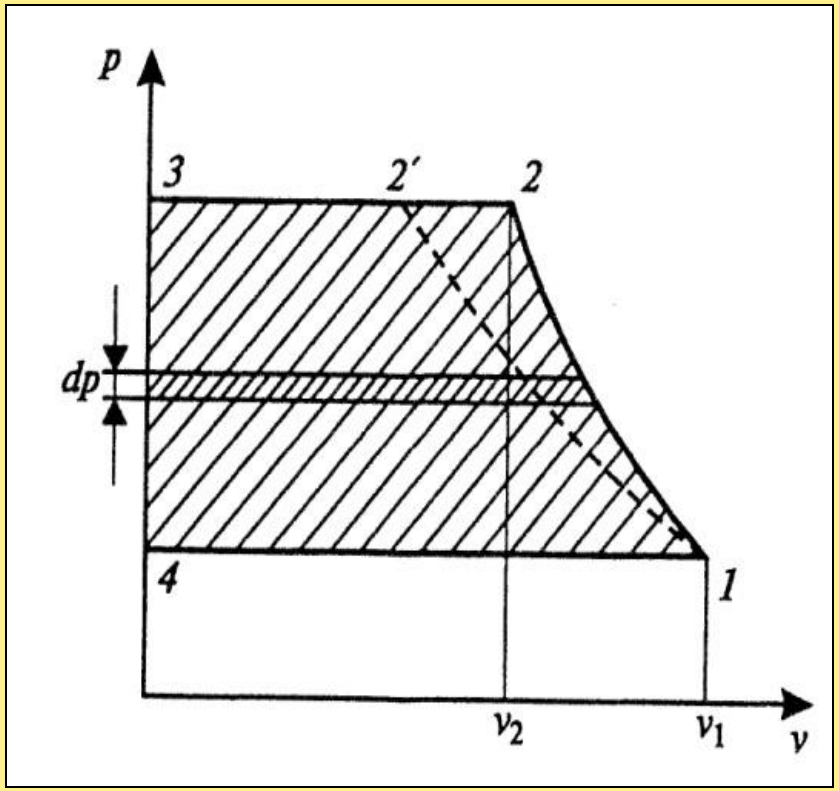
Цикл газотурбинной установки с регенерацией отбросной теплоты



степень регенерации

$$\sigma = \frac{T_{5'} - T_2}{T_5 - T_2}$$

5.5. Компрессоры



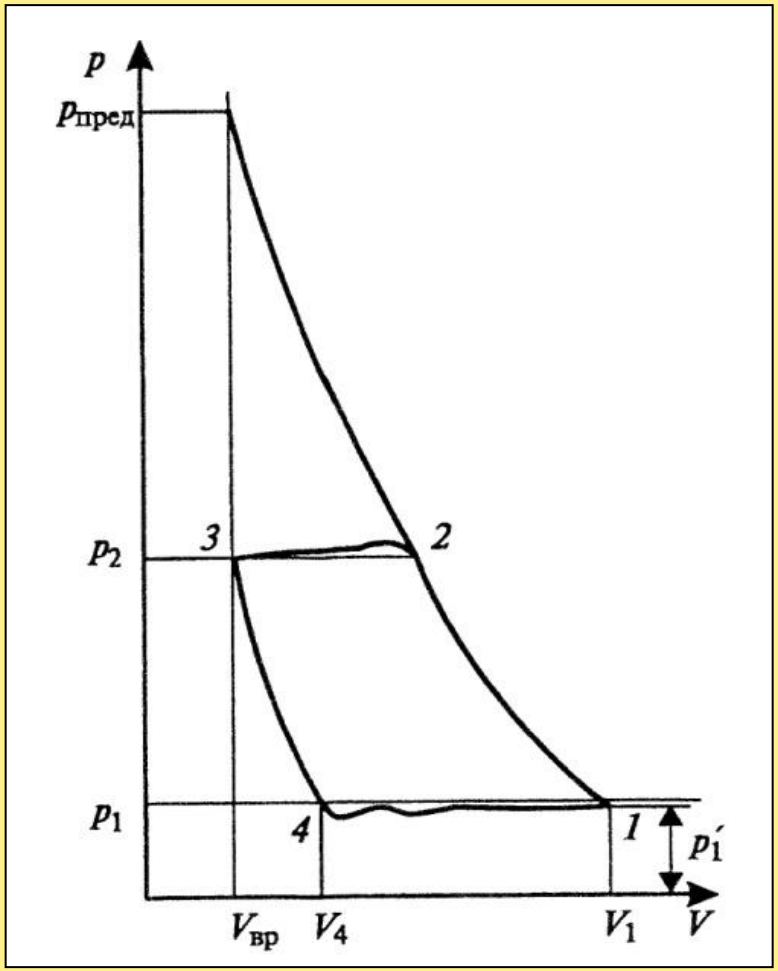
Теоретический рабочий цикл в одноступенчатом поршневом компрессоре

$$l = \int_1^2 \upsilon dp = \frac{k}{k-1}\left[p_2\upsilon_2 - p_1\upsilon_1\right] =$$

$$= \frac{k}{k-1} p_1\upsilon_1\left(\pi^{(k-1)/k} - 1\right)$$

где $\pi = p_2/p_1$ – степень повышения давления

Индикаторная диаграмма реального одноступенчатого компрессора



- Объемный КПД компрессора

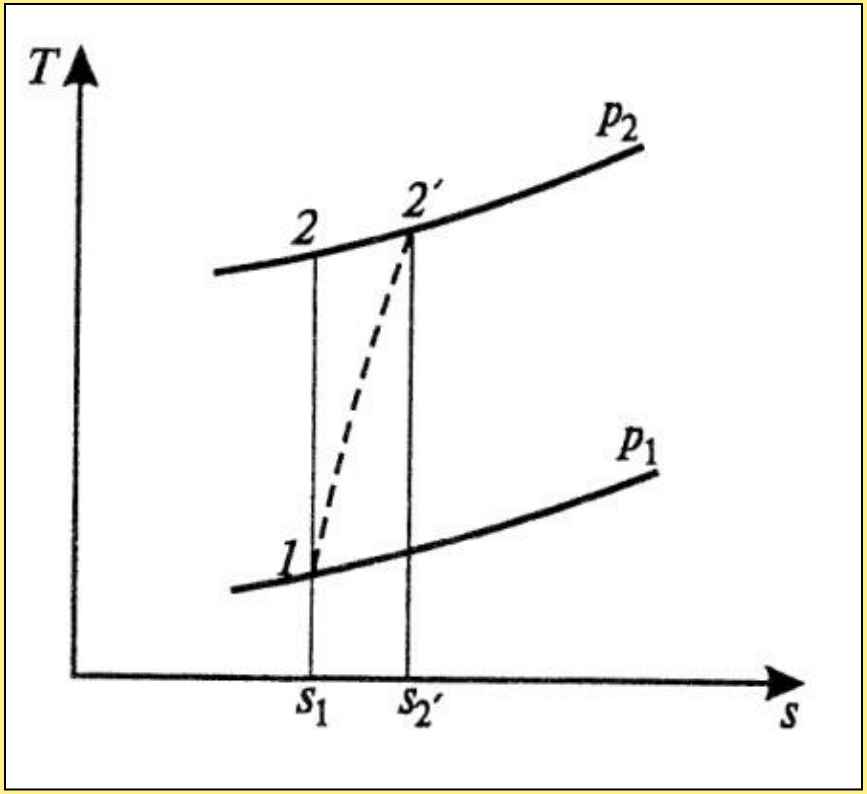
$$\eta_{об} = \frac{V_1 - V_4}{V_1 - V_{вр}}$$

$V_{вр}$ - объём «вредного» пространства

- Коэффициент наполнения

$$\eta_{нап} = \eta_{об} \frac{T_0 p_1'}{T_{1'} p_1}$$

Характеристики реального одноступенчатого компрессора



Необратимый процесс сжатия в компрессоре

- Адиабатный КПД компрессора

$$\eta_{ад} = \frac{l_т}{l_д} = \frac{T_2 - T_1}{T_{2'} - T_1}$$

Действительная работа сжатия

$l_д = -(i_{2'} - i_1) = -c_p(T_{2'} - T_1)$;

Теоретическая работа

$l_т = -(i_2 - i_1) = -c_p(T_2 - T_1)$.

$$\eta_{ад} = \frac{l_т}{l_д} = \frac{\pi^{(k-1)/k} - 1}{\pi^{(n-1)/n} - 1}$$

Характеристики реального одноступенчатого компрессора

- Реальная удельная работа цикла

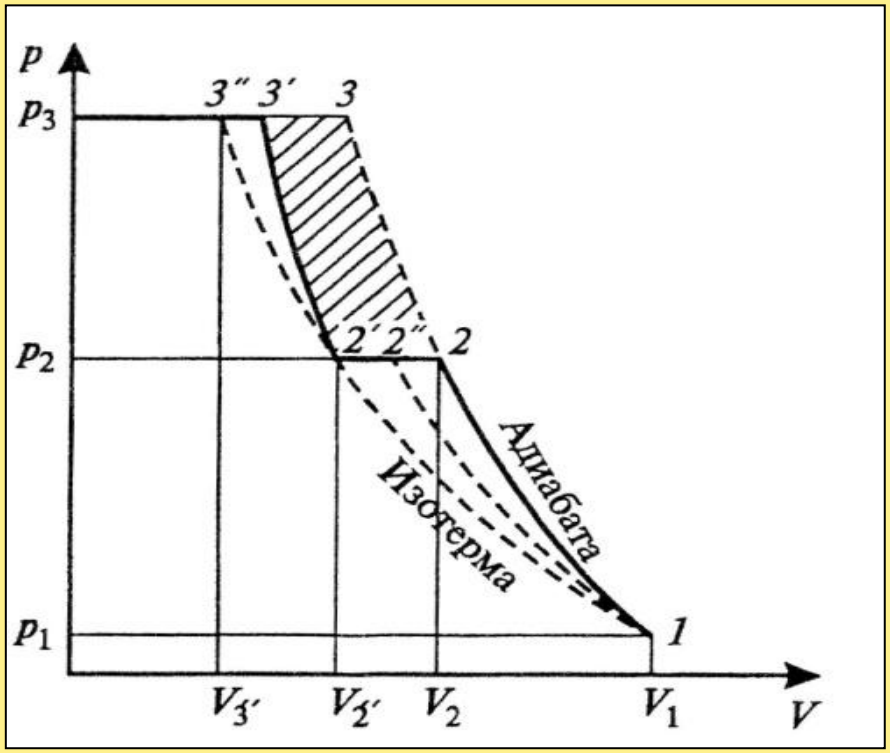
$$l_i = \frac{l_т}{\eta_{ад}} = \frac{k}{\eta_{ад}(k-1)} p_1 \upsilon_1 \left[\pi^{(k-1)/k} - 1\right]$$

- Массовая производительность одного цилиндра компрессора (кг/с)
- $$G_c = \frac{1}{60} \rho_0 \eta_{нап} n \left(V_1 - V_{вр}\right)$$
- где n – частота вращения вала компрессора, об/мин.
- Необходимая мощность привода компрессора , кВт

$$N = \frac{G_c k p_1 \upsilon_1 \left(\pi^{(k-1)/k} - 1\right)}{\eta_{ад} \eta_{мех} (k-1)} \cdot 10^{-3}$$

- где $\eta_{мех}$ – механический КПД компрессора

5.6. Многоступенчатый поршневой компрессор



Теоретическая диаграмма сжатия газа в двухступенчатом компрессоре

- Общая степень повышения давления в n-ступенчатом компрессоре

$$\pi = \pi_1 \pi_2 \ldots \pi_n.$$

Преимущества:

- экономия энергии привода
- Понижение температуры деталей цилиндропоршневой группы

Контрольные вопросы и задания к главе 5

1. Почему современные поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) не проектируют на основе теоретического цикла Карно?
2. Назвать основные безразмерные характеристики теоретических циклов поршневых ДВС.
3. Назвать три основных теоретических цикла поршневых ДВС.
4. Сравнить термические КПД трех теоретических циклов поршневых ДВС при одинаковой степени сжатия и одинаковых ограничениях по максимальному давлению и максимальной температуре цикла.
5. Как определить эффективный КПД реального теплового двигателя?
6. Как определить мощность на валу теплового двигателя?
7. Охарактеризовать теоретический цикл газотурбинной установки, определить его термический КПД.

Контрольные вопросы и задания к главе 5

8. Определить термический КПД теоретического цикла ГТУ с регенерацией отбросной теплоты.
9. Как можно регенерировать теплоту в тепловом двигателе?
10. Представить теоретический «цикл» поршневого компрессора в осях p, v.
11. Что называется степенью повышения давления в компрессоре?
12. Показать на графике отличие «цикла» реального поршневого компрессора от теоретического.
13. Что называется «вредным» пространством поршневого компрессора?
14. Что называется объемным КПД поршневого компрессора?
15. Что называется коэффициентом наполнения поршневого компрессора?

Глава 6.
РЕАЛЬНЫЙ ГАЗ. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

6.1. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Пограничные кривые агрегатных состояний

Реальный газ

Модель идеального газа не учитывает объем, занимаемый самими молекулами газа, и силы притяжения между молекулами. Реальный газ сжимаем постольку, поскольку в занимаемом им объеме есть пространство, не занятое его частицами.

Если удельный объем предельно упакованных частиц (b, м^3/кг) сравнить с удельным объемом газа v, то сжимаемая часть этого объема составит разность $(v - b)$.

Реальный газ

Все частицы газа гравитационно взаимодействуют между собой.

Это взаимодействие оказывается уравновешенным для всех частиц, за исключением находящихся в соприкосновении со стенками вмещающего газ сосуда.

Эти частицы находятся под воздействием отрывающей их от стенки равнодействующей сил притяжения окружающими в полупространстве частицами газа.

От поверхности занимаемого газом объема эта сила направлена внутрь и создает в газе так называемое внутреннее давление, не воспринимаемое (не измеряемое) манометром.

Уравнение Ван-дер-Ваальса

Учет внутреннего давления в уравнении состояния достигается прибавлением к абсолютному давлению величины внутреннего давления.

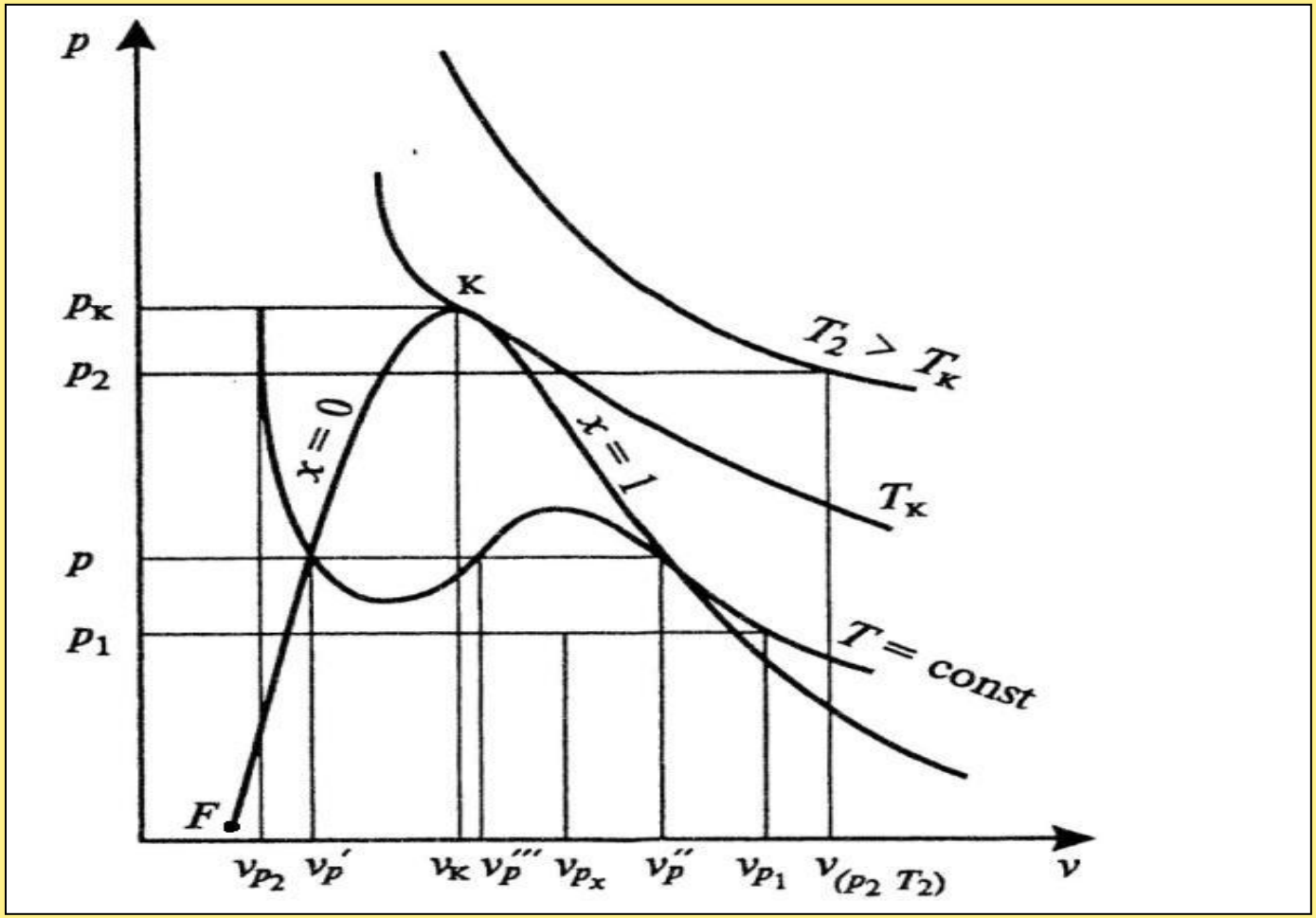
$$(p + a/v^2)(v - b) = RT,$$

где a и b — определяемые эмпирически постоянные для данного газа.

При фиксированных p и T уравнение имеет либо один, либо три вещественных корня (v_p', v_p'', v_p'''),

т. е. изобара p = const пересекает кривую $p = p(v)$ в одной или трех точках.

Графическое представление уравнения Ван-дер-Ваальса



Пограничные кривые агрегатных состояний

При $v_p = v_p''$ газ представляет собой *сухой насыщенный пар*.

Точка $v_p = v_p'$ соответствует жидкости в состоянии насыщения.

Между точками v_p' и v_p'' газ представляет собой двухфазную среду: смесь сухого насыщенного пара и жидкости.

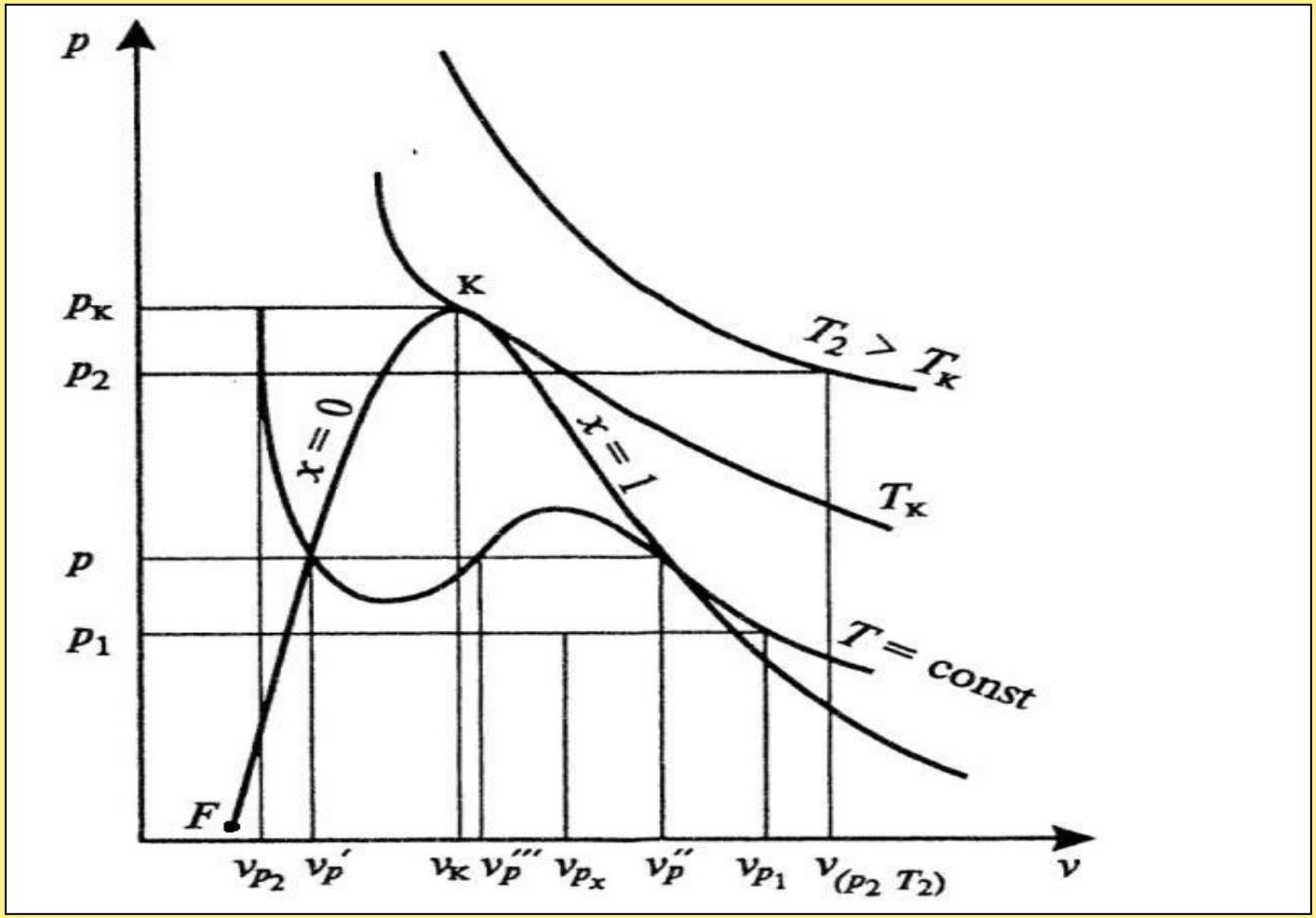
Такая двухфазная смесь называется *влажным паром*.

Пограничные кривые агрегатных состояний

Переход из газообразного состояния в жидкое через двухфазное состояние (газ — жидкость) осуществляется по горизонтальной изотерме $v_p''–v_p'$ при постоянном давлении.

С повышением температуры газа T сокращается и разность $v_p''–v_p'$. При некотором критическом сочетании температуры $T_к$ и давления $p_к$ эта разность становится нулем (точка «к» на рисунке.).

Графическое представление уравнения Ван-дер-Ваальса



Пограничные кривые агрегатных состояний

Вещество в состоянии с параметрами $\upsilon_к$, $p_к$, $T_к$ утрачивает четко выраженные свойства жидкого или газообразного агрегатного состояния.

При таких критических параметрах газ переходит в жидкость и наоборот без теплообмена.

Точка с параметрами $\upsilon_к$, $p_к$, $T_к$ называется *двойной критической точкой*.

Пограничные кривые агрегатных состояний

- Наличие критической точки на изотерме Ван-дер-Ваальса означает, что для каждой жидкости существует такая температура, выше которой вещество может существовать только в газообразном состоянии.

Пограничные кривые агрегатных состояний

Непрерывная последовательность точек на диаграммах $p–v$, $T–s$ и т. п., соответствующих состояниям начала конденсации ($p–v''$) и ее конца ($p–v'$), называется *пограничной кривой*.

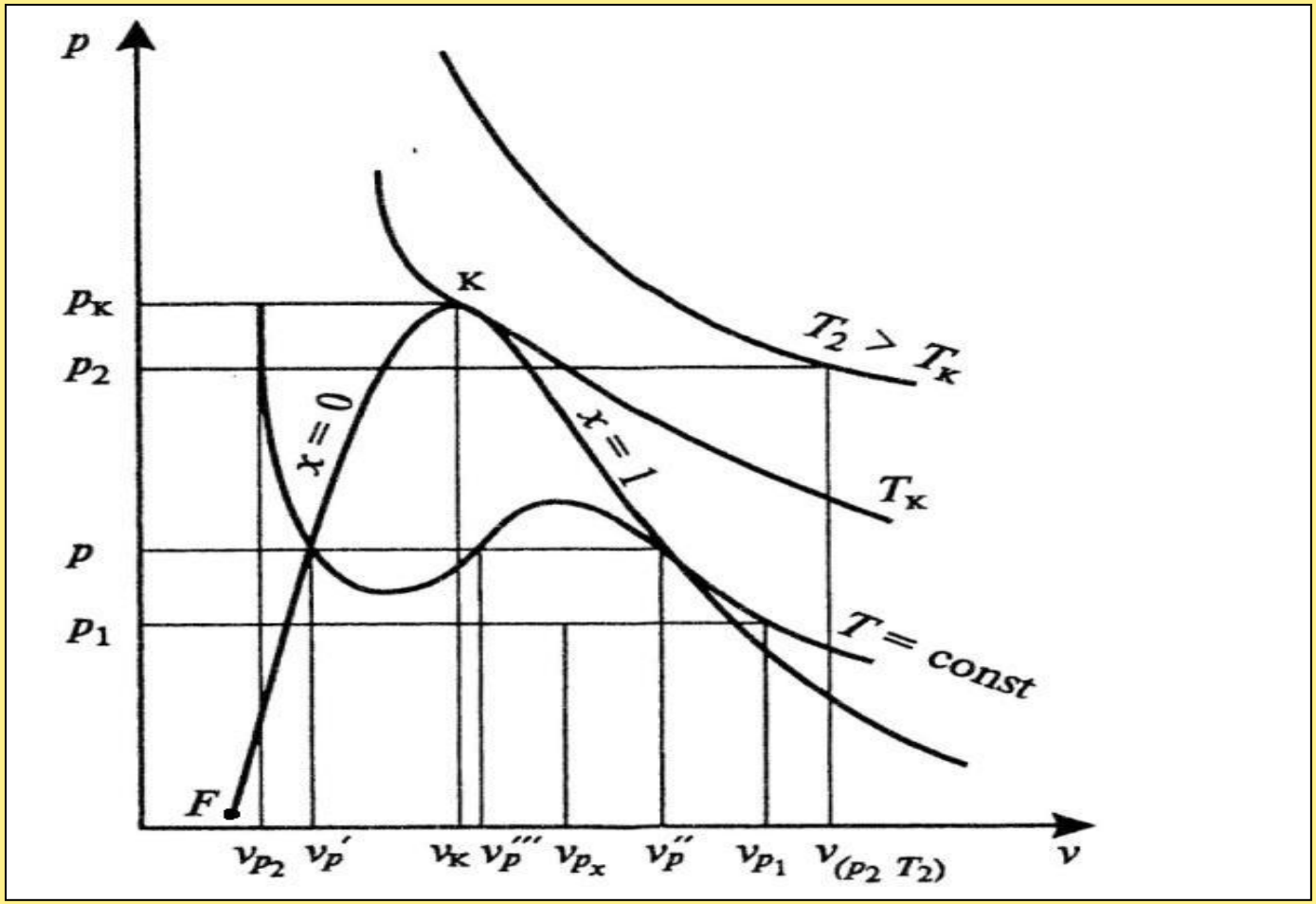
Пограничные кривые агрегатных состояний

Критическая точка «к» делит ее на нижнюю (левую) пограничную кривую, точки которой изображают жидкость на линии насыщения ($x = 0$), и верхнюю (правую) пограничную кривую, точки который изображают пар на лини насыщения ($x = 1$).

Пограничные кривые агрегатных состояний

- При параметрах слева от нижней пограничной кривой рабочее тело находится в жидком состоянии, справа от верхней пограничной кривой — в состоянии перегретого пара (или газа). Точки внутри пограничных кривых соответствуют различным состояниям влажного пара.

Графическое представление уравнения Ван-дер-Ваальса



Пограничные кривые агрегатных состояний

- Переход в изобарном процессе с левой ветви пограничной кривой на правую ветвь изображает процесс *кипения*, переход в обратную сторону — процесс *конденсации*.

Пограничные кривые агрегатных состояний

Нижняя пограничная кривая начинается в так называемой *фундаментальной* или *тройной критической точке* (*F*).

Это точка с параметрам p_F, v_F, T_F, при которых три состояния вещества находятся в термодинамическом равновесии и *переходят одно в другое без теплообмена*. При этом $v_F' = v_F'' = b$ в уравнении Ван-дер-Ваальса.

6.2. Пар и его свойства

- *Состоянием насыщения называется такое состояние с параметрами* T_s, p_s, *при котором пар находится в термодинамическом равновесии со своей жидкостью*. В этом случае пар и его жидкость называются *насыщенными*.
- Количество теплоты, необходимое для полного испарения 1 кг жидкости, называется *удельной скрытой теплотой парообразования r* (Дж/кг).

Пар и его свойства

- *Сухой пар* — это пар, не содержащий капелек жидкости.
- *Влажный пар* — *это* механическая смесь сухого насыщенного пара и жидкости.
- Относительное содержание в двухфазной смеси массы сухого насыщенного пара называется *степенью сухости влажного пара*:

$$x = m_{\text{с.н.п}}/m_{\text{см}}.$$

- Величина $(1 - x)$ называется *степенью влажности пара*.

Параметры влажного пара

- *Удельный объём:* $v_{px} = xv_p'' + (1 - x)v_p'$.
- *Энтальпия:* $i_x = i'(1 - x) + i''x$.
- *Внутренняя энергия* $u_x = u'(1 - x) + u''x$.
- *Энтропия:* $s_x = s'(1 - x) + s''x$.

Параметры с одним штрихом относятся к жидкости на линии насыщения, а параметры с двумя штрихами — к пару на линии насыщения.

Если температура пара выше температуры насыщения при данном давлении, то такой пар называется *перегретым*

6.3. Термодинамические свойства воды и водяного пара

- В фундаментальной (тройной критической) точке вода имеет параметры:

$$p_F = 0{,}00061 \text{ МПа}; \; t_F = 0{,}01 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

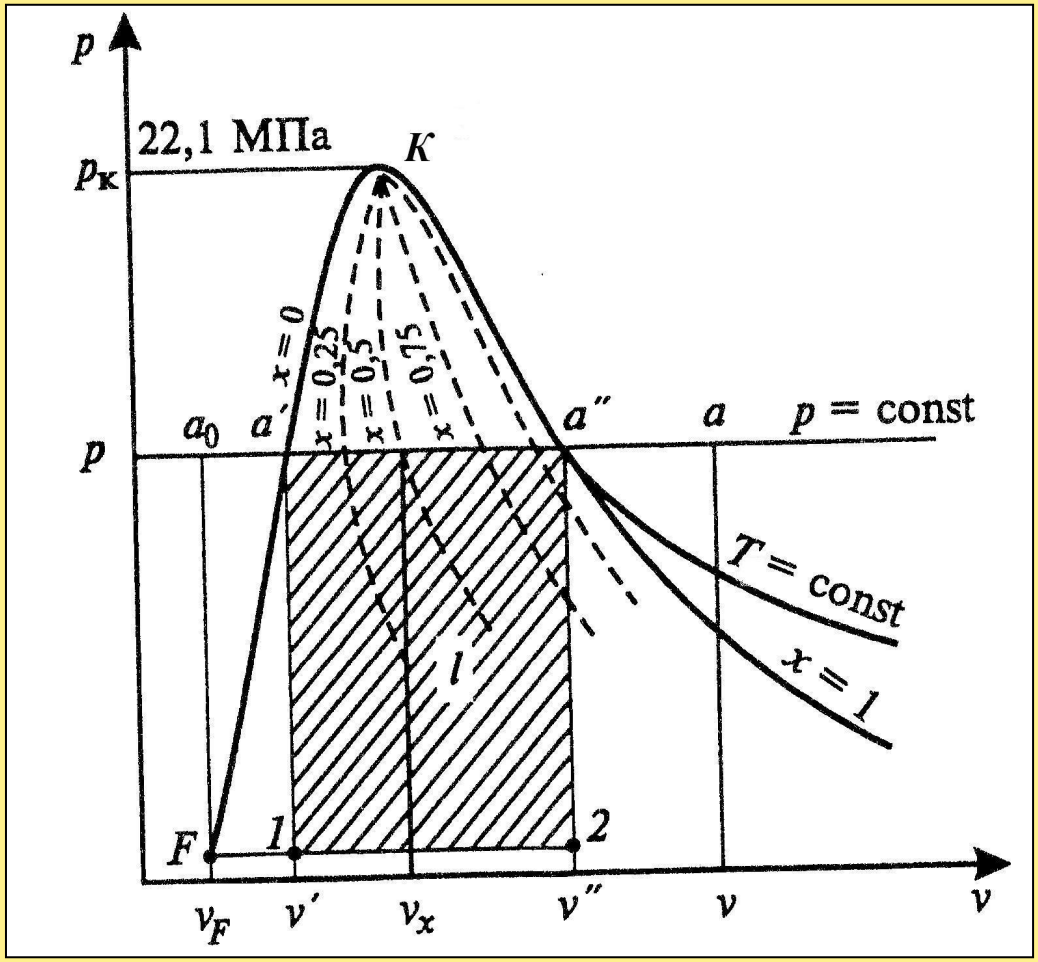
- Для этого состояния полагают, что внутренняя энергия, энтальпия и энтропия воды равны нулю:

$$u_F = 0; \; i_F = 0; \; s_F = 0.$$

- В двойной критической точке «к» :

$$p_к = 22{,}1 \text{ МПа}; \; t_к = 374 \text{ }^{\circ}\text{C}).$$

Процесс получения пара



Зависимость температуры кипения воды от давления

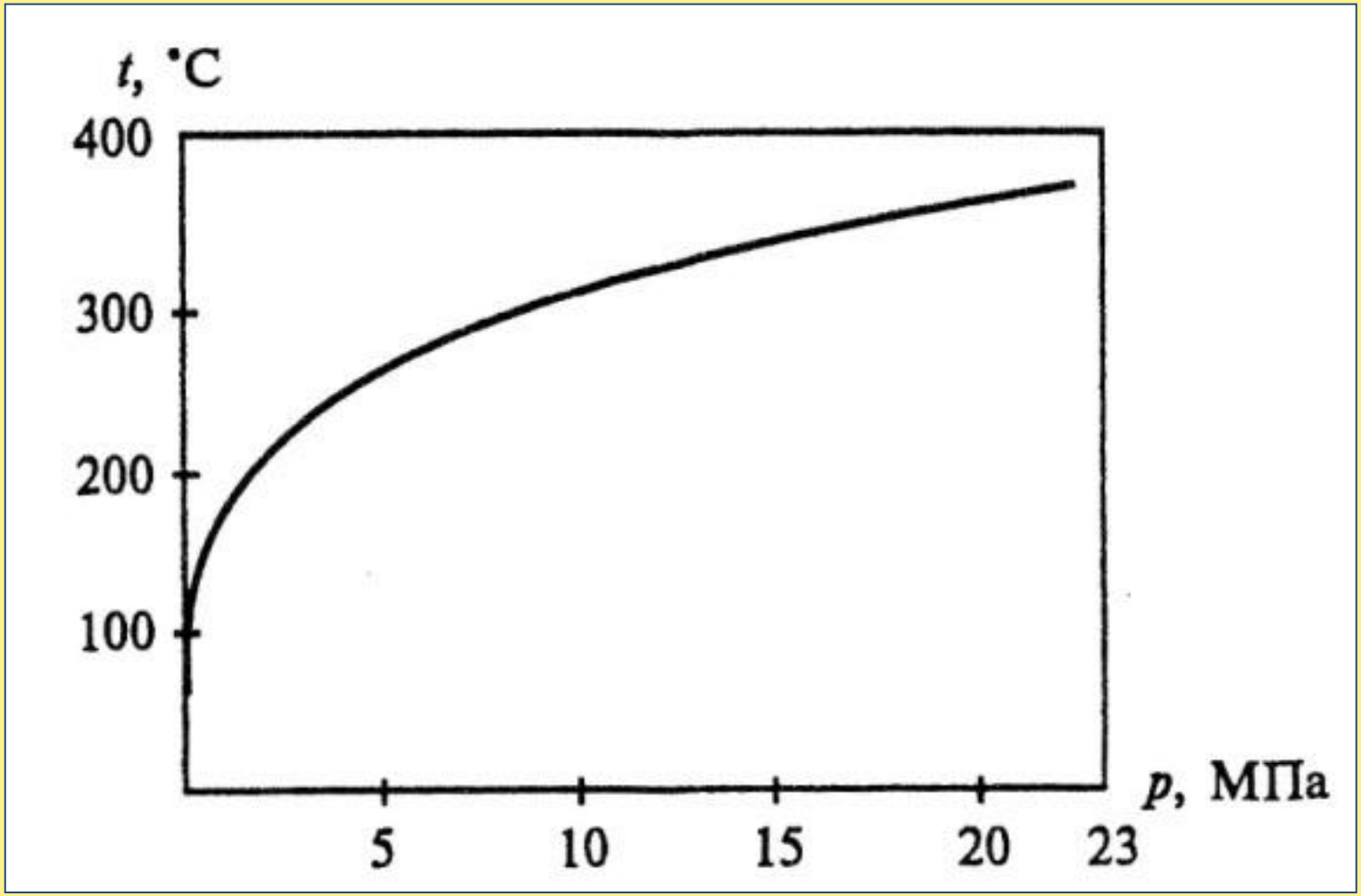
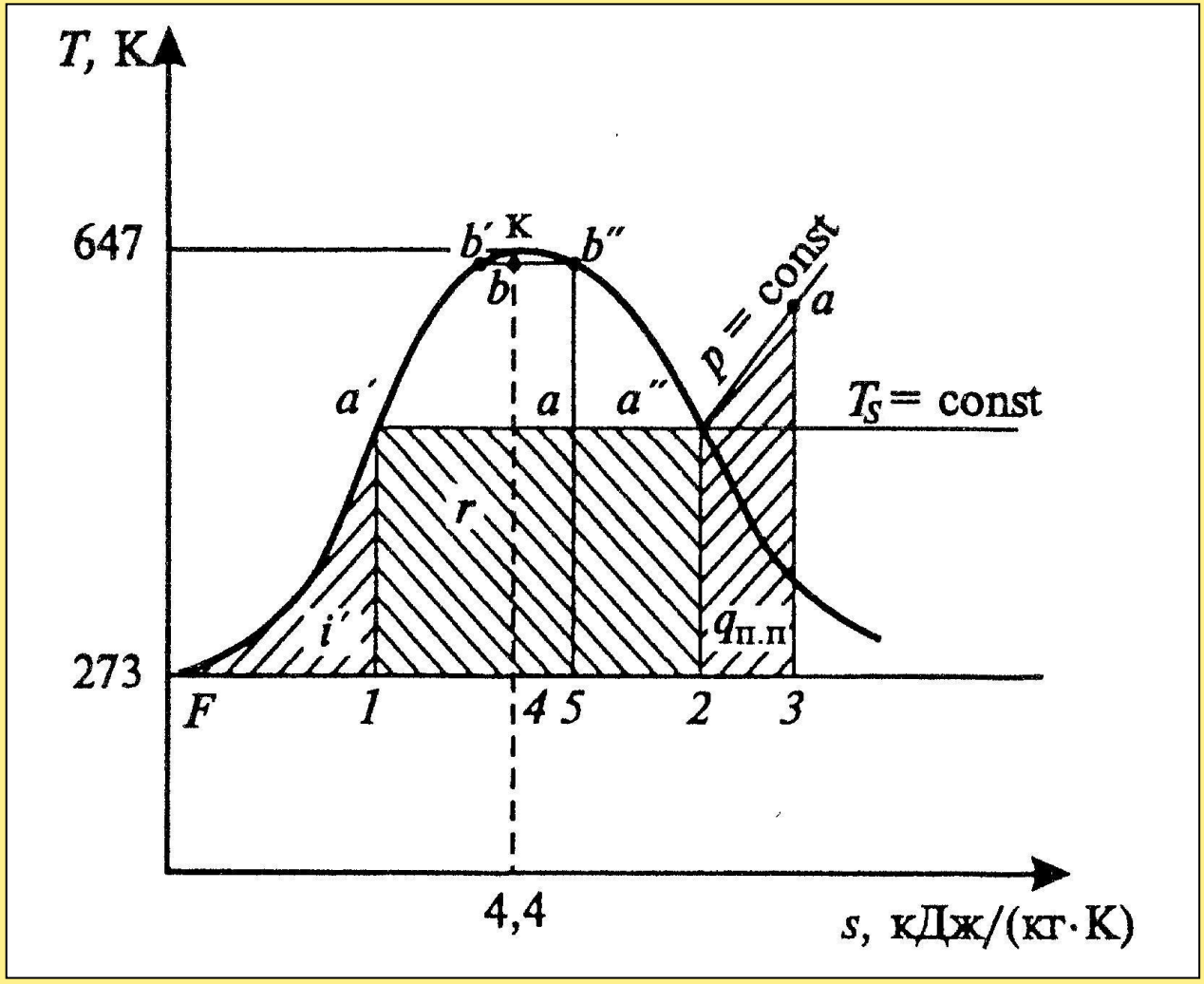


Диаграмма T-s водяного пара (не в масштабе)



Удельная скрытая теплота парообразования (r) представляет собой площадь *1–a′–a″–2*

Термодинамические свойства воды и водяного пара

- Энтальпия сухого насыщенного пара,:

$$i'' = i' + r$$

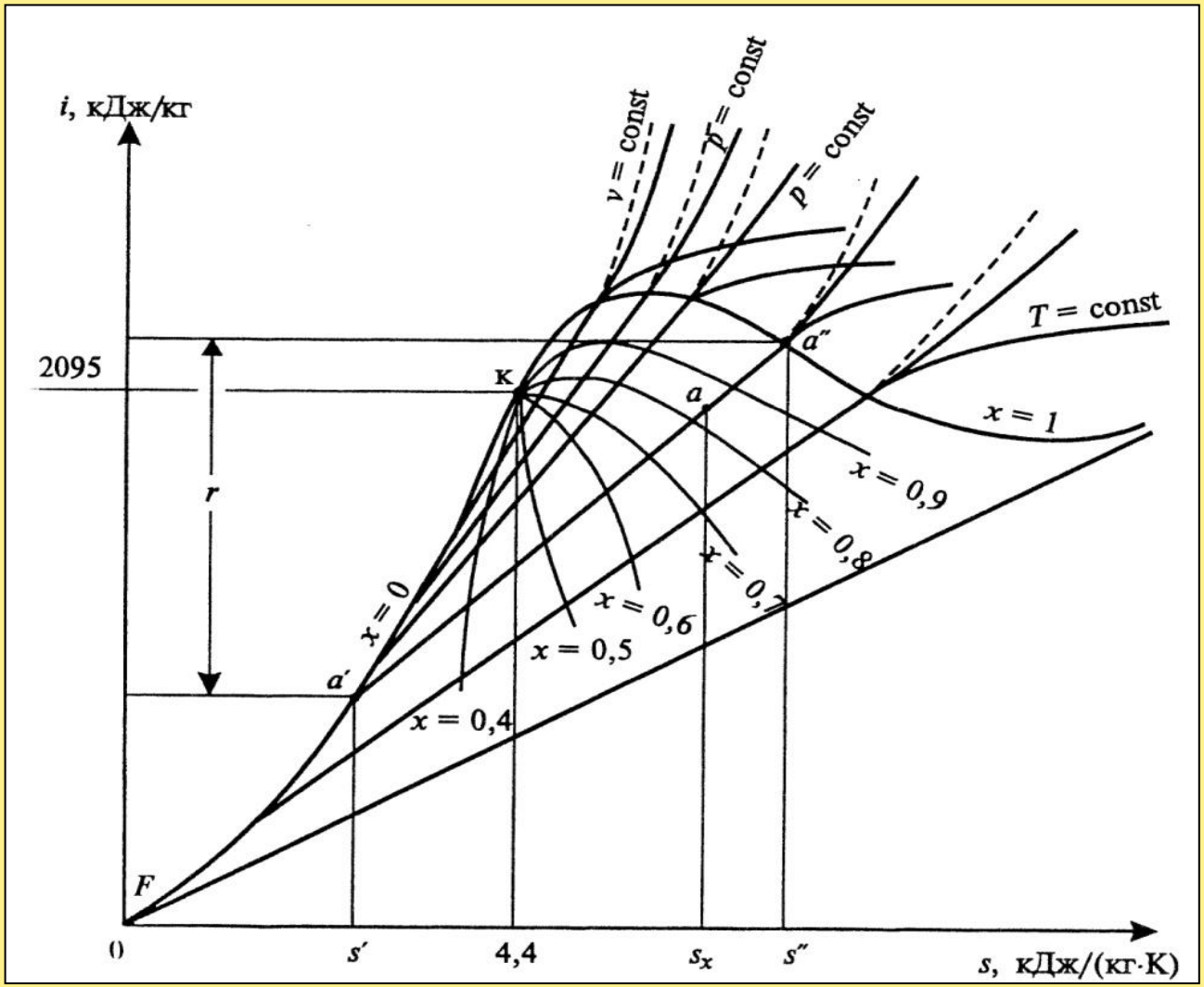
- Энтальпия перегретого пара :

$$i_{\text{п.п.}} = i' + r + c''_p \Big|_{t_s}^{t_{\text{п.п.}}} \left(t_{\text{п.п}} - t_s\right)$$

- Энтропия перегретого пара :

$$s_{\text{п.п}} = s' + \frac{r}{T_s} + c_p \Big|_{t_s}^{t_{\text{п.п}}} \ln\left(T_{\text{п.п}} / T_s\right)$$

. Диаграмма i-s водяного пара (не в масштабе)



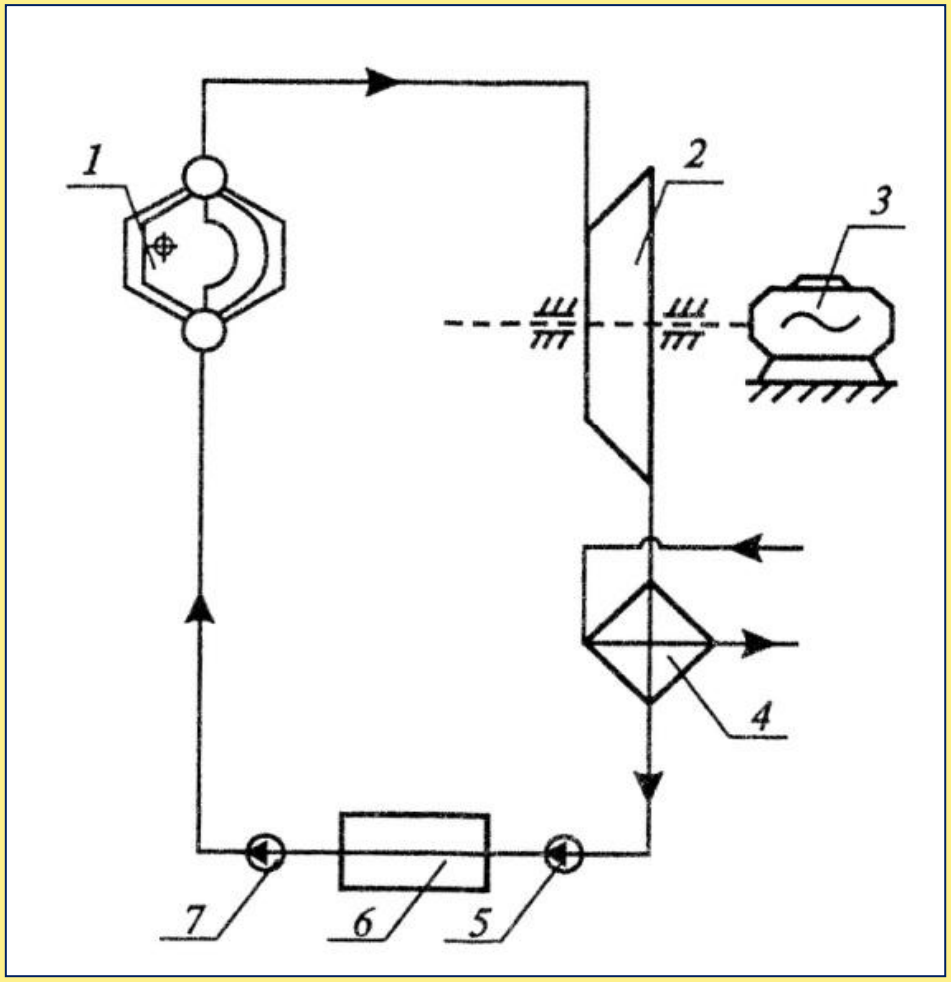
Контрольные вопросы и задания к главе 6

1. Назвать основные отличия реального газа от идеального.
2. Написать уравнение Ван-дер-Ваальса.
3. Определить пограничные кривые фазовых превращений.
4. Назвать фундаментальную и двойную критические точки воды, их параметры состояния.
5. Дать определение скрытой теплоты парообразования.
6. Дать описание термодинамических процессов на фоне пограничных кривых на осях $p–v$, $T–s$ и $i–s$.

Глава 7.
ЦИКЛЫ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

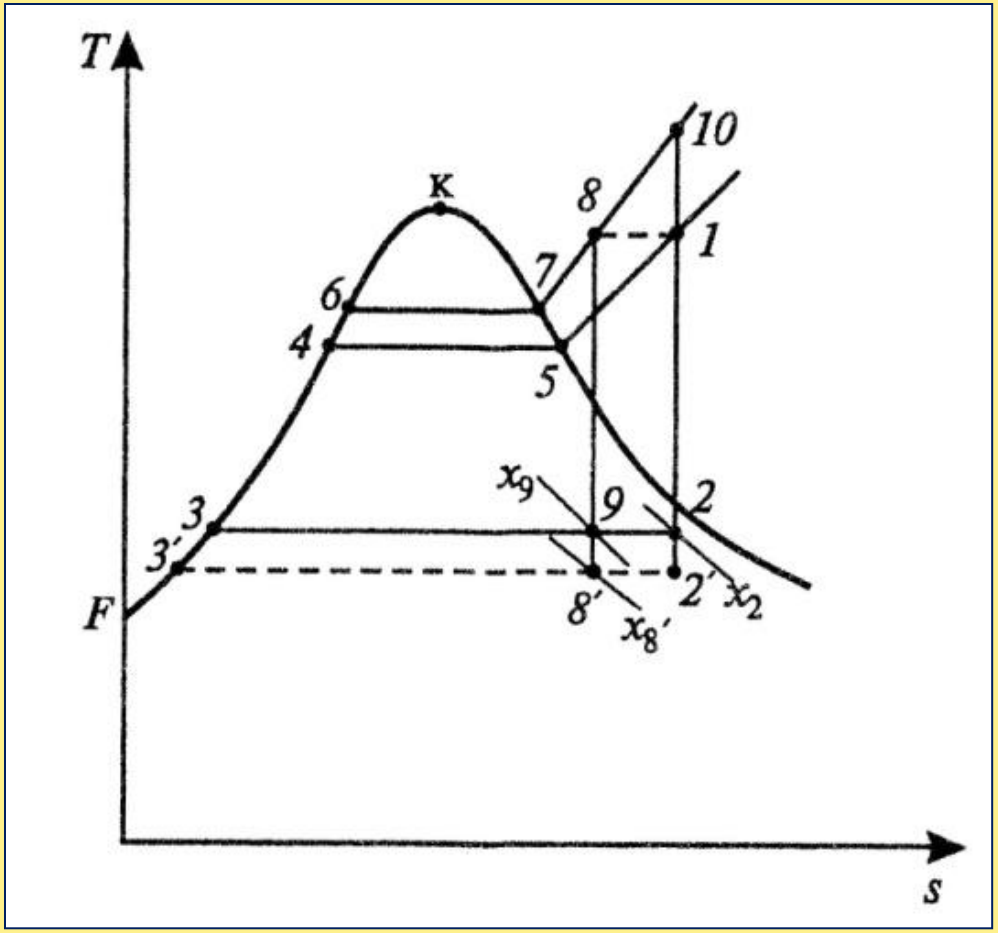
7.1. ЦИКЛЫ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК. Цикл Ренкина

Принципиальная схема паротурбиной установки



1. котёл с пароперегревателем ,
2. турбина,
3. потребитель,
4. конденсатор,
5. конденсатный насос ,
6. «теплый ящик»,
7. питательный насос.

Циклы Ренкина в координатах T-s



1–2 адиабатическое расширение пара в турбине

2–3 процесс конденсации пара

3-4 подогрев воды до температуры насыщения

4-5 испарение воды

5-1 перегрев пара.

7.2. Влияние параметров пара на КПД цикла Ренкина

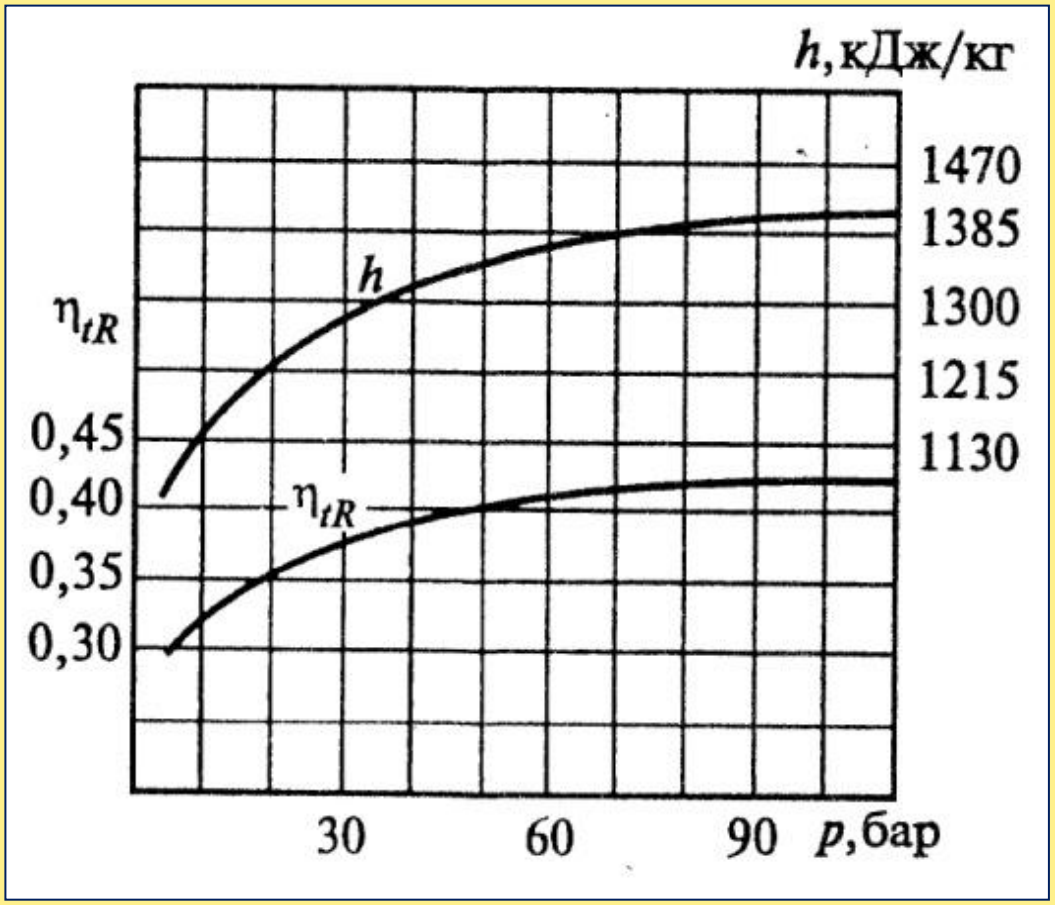
$$\eta_{tR} = \frac{h}{q_1} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_3}$$

$h = i_1 - i_2$ полезная работа,

q_1 - количество подведённой теплоты.

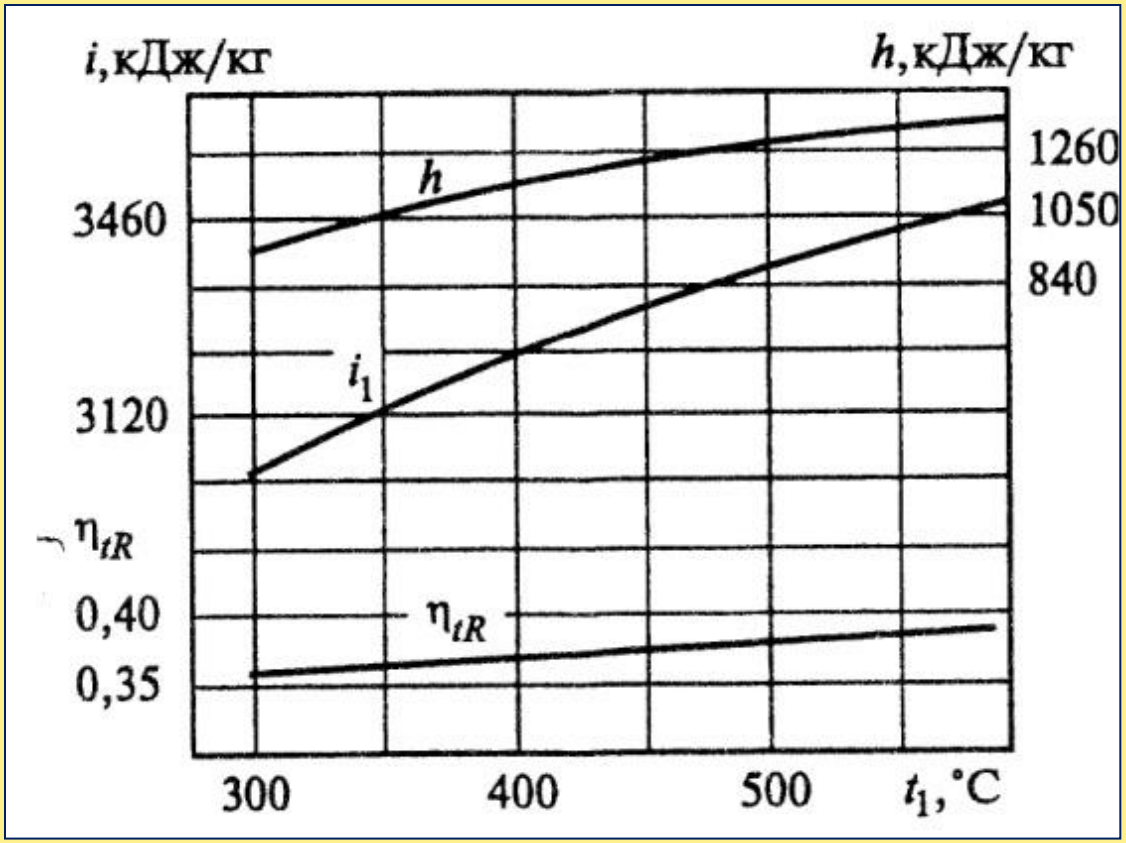
- Термический КПД будет тем выше, чем выше давление и температура пара на входе в турбину (p_1, $T_{1)}$ и чем ниже давление в конденсаторе (p_2).

Влияние параметров пара на КПД цикла Ренкина



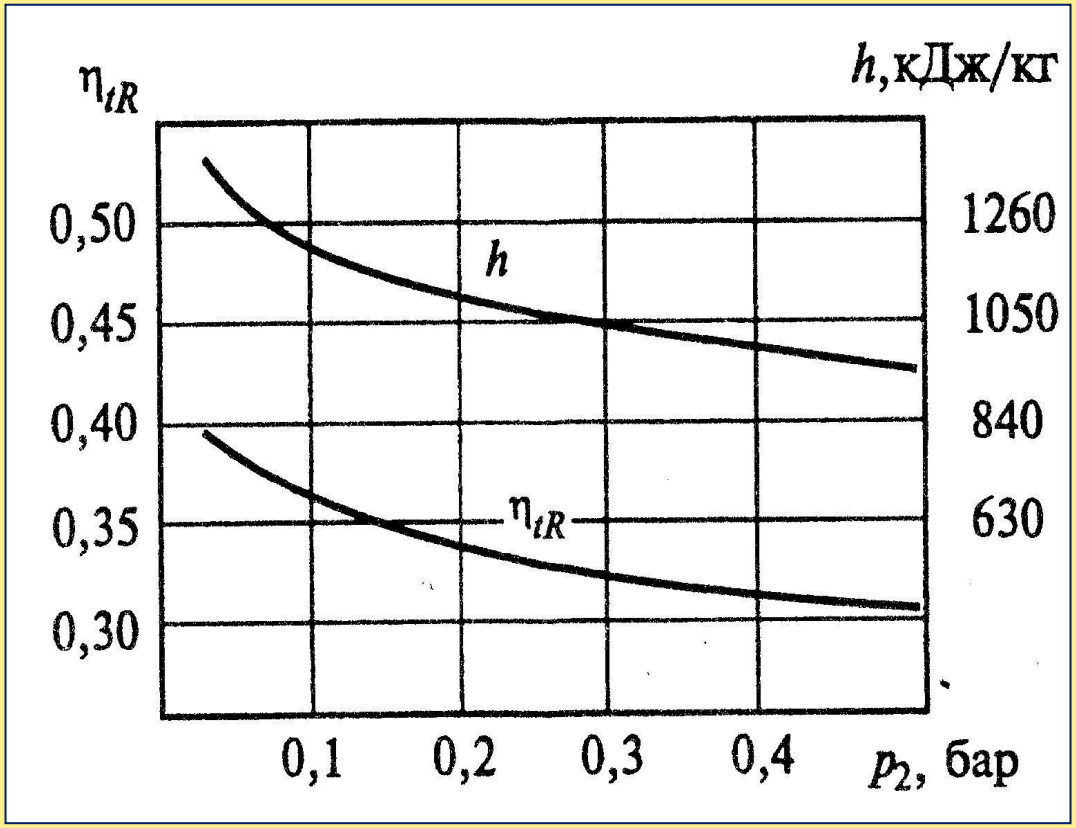
Зависимость термического КПД цикла Ренкина от давления пара на входе в турбину (p_1) при температуре t_1 = 500 °С и давлении в конденсаторе p_2 = 0,04 бар

Влияние параметров пара на КПД цикла Ренкина



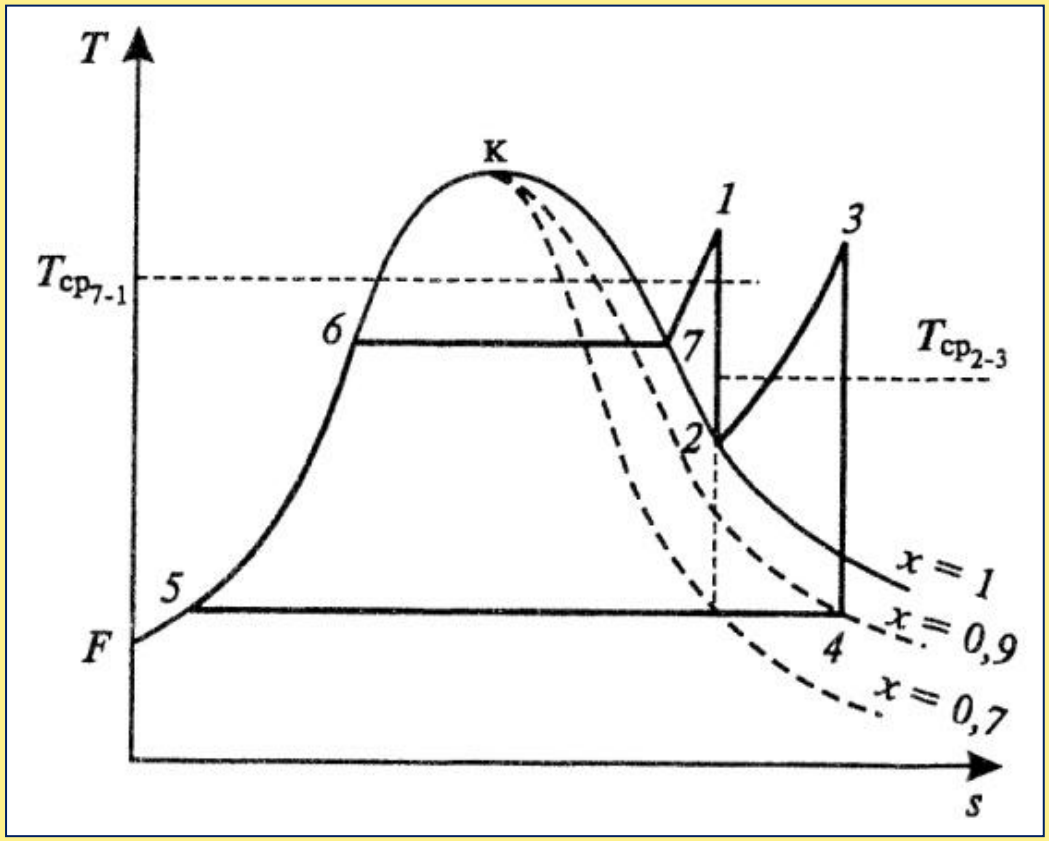
Зависимость термического КПД цикла Ренкина от температуры пара на входе в турбину (t_1) при давлении p_1= 30 бар и давлении в конденсаторе p_2= 0,04 бар

Влияние параметров пара на КПД цикла Ренкина



Зависимость термического КПД *цикла Ренкина от давления пара в конденсаторе* (p_2) *при давлении и температуре пара на входе в турбину* $p_1 = 30$ *бар и* $t_1 = 500\ ^oC$.

7.3. Цикл Ренкина с промежуточным перегревом пара



1–2 , 3-4 адиабатическое расширение пара в 1-й и 2-й ступенях турбины

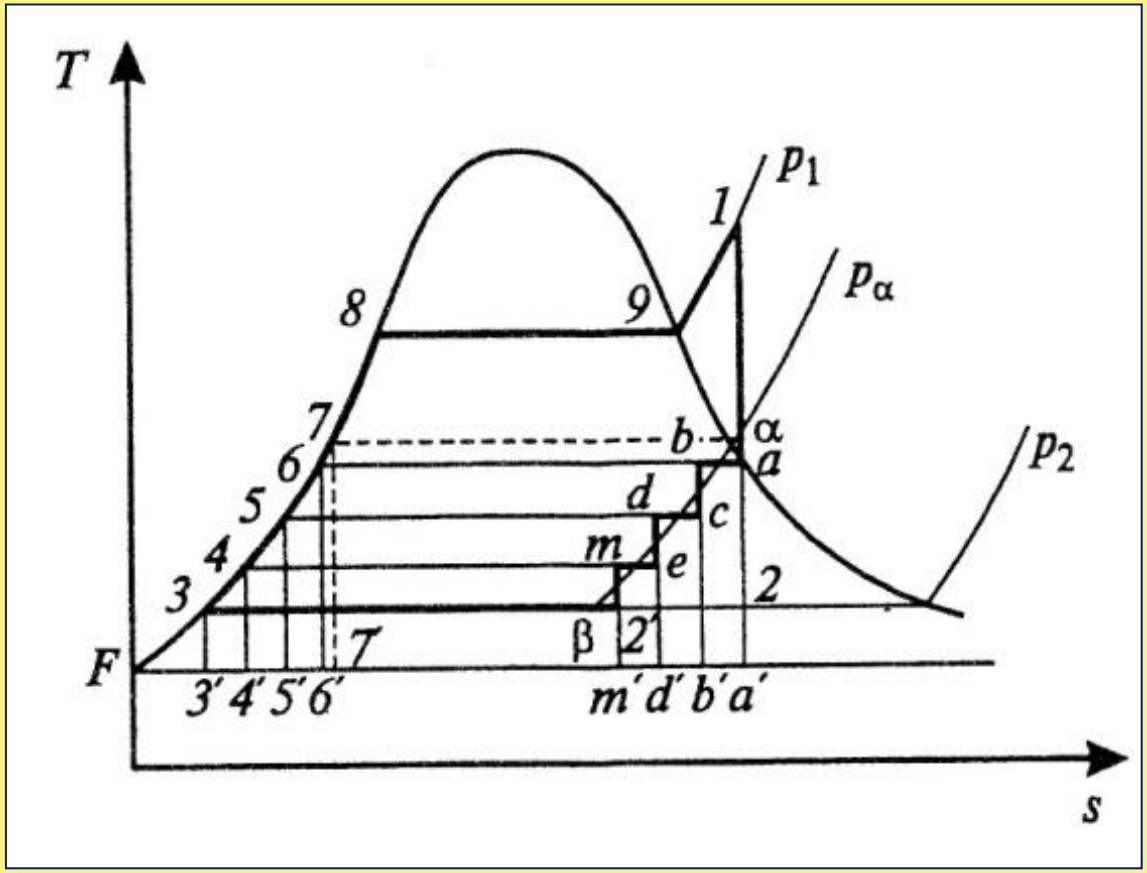
2–3, 7-1 перегрев пара

4-5 процесс конденсации пара

5-6 подогрев воды до температуры насыщения

6-7 испарение воды.

7.4. Цикл Ренкина с регенерацией теплоты



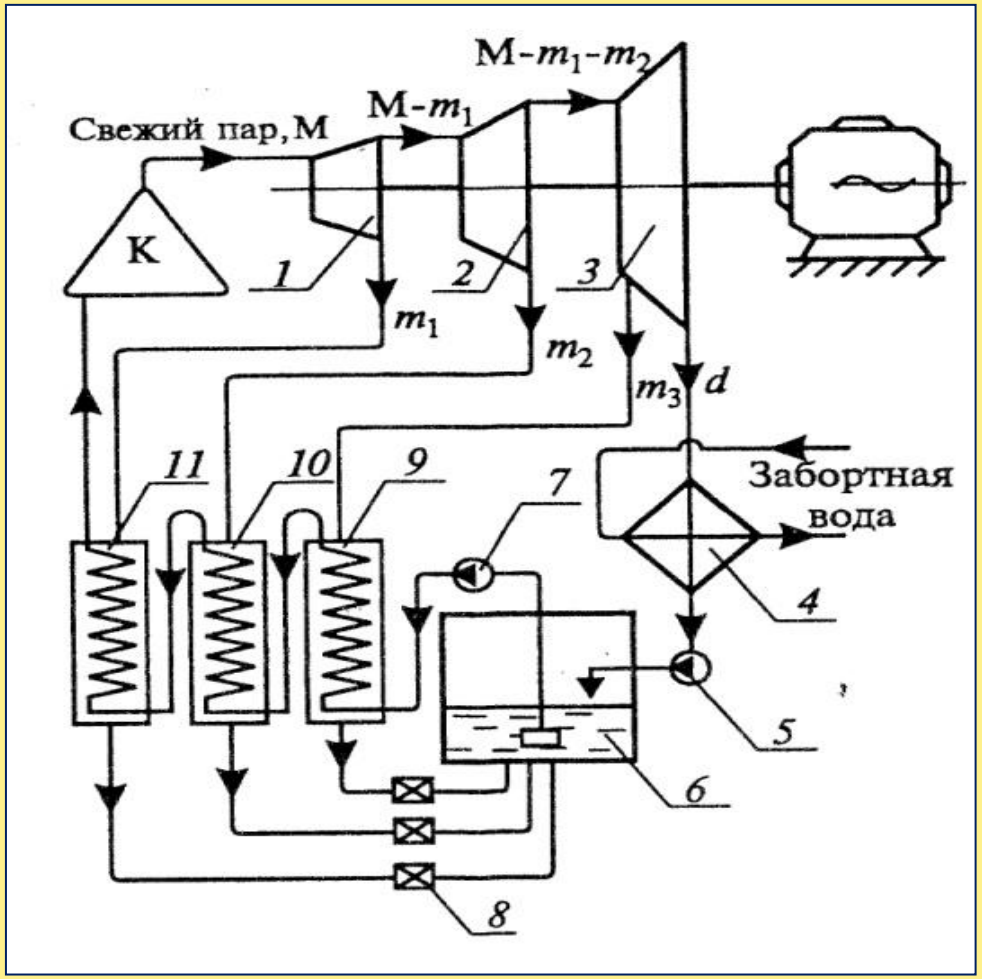
Регенерацию осуществляют дискретно в нескольких ступенях отбора пара на подогрев питательной воды (т. е. в процессах

a–b и *5–6*;

c–d и *4–5*;

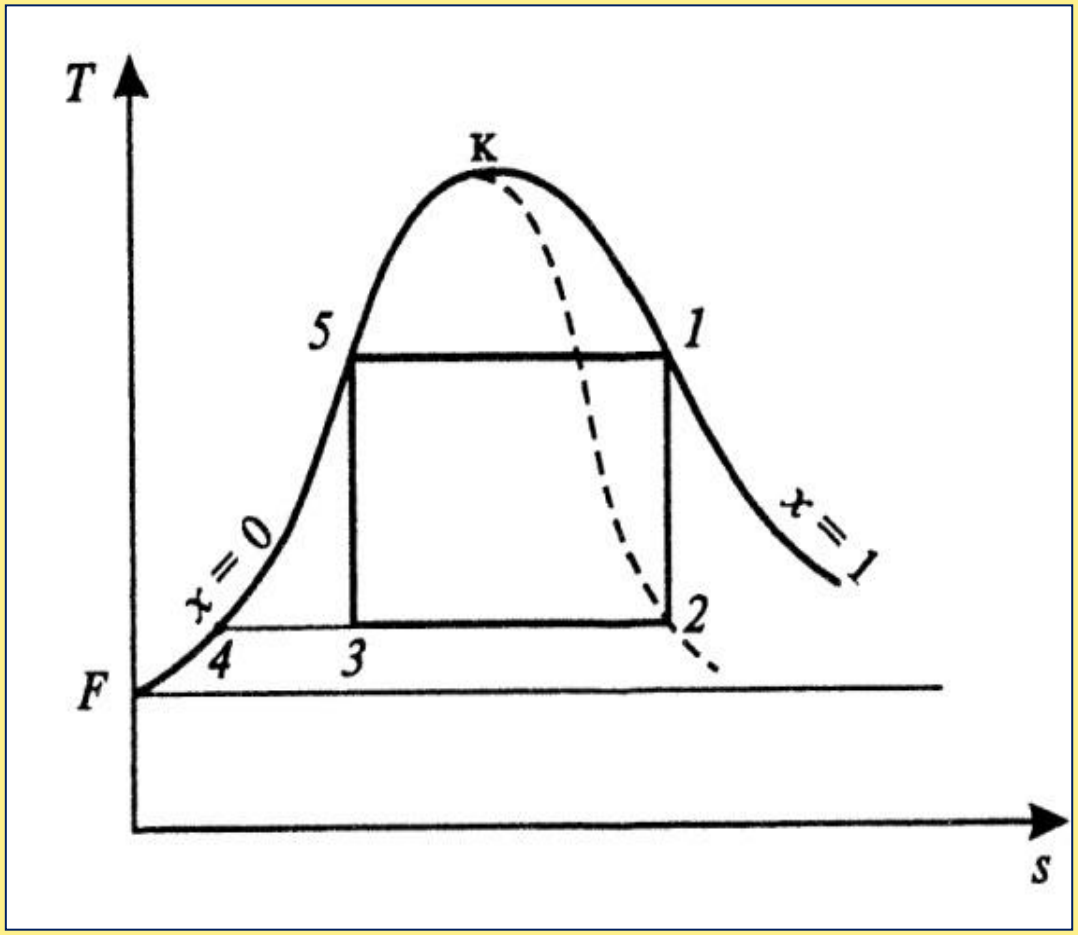
e–m и *3–4*).

Схема ПТУ с регенерацией теплоты



К -котёл с пароперегревателем ,
1, 2, 3 – ступени турбины,
4. конденсатор,
5. конденсатный насос
6. «теплый ящик»,
7. питательный насос,
8. дроссельные клапаны ,
9, 10 и *11* - теплообменники.

7.5. Паротурбинная установка с циклом Карно



1–2 адиабатическое расширение пара в турбине

2–3 процесс конденсации пара

3-4 сжатие пароводяной смеси в компрессоре

4-5 испарение воды

Контрольные вопросы и задания к главе 7

1. Описать теоретический цикл паротурбинной установки (ПТУ, цикл Ренкина) в координатах $p–v$, $T–s$ и $i–s$.
2. Назвать модификации цикла Ренкина.
3. Указать влияние параметров пара на КПД цикла Ренкина.
4. Почему ПТУ не проектируются на основе теоретического цикла Карно?

Глава 8.
ТЕЧЕНИЕ УПРУГОЙ СРЕДЫ

8.1. Первый закон термодинамики для потока упругой (сжимаемой) среды

Под *упругой средой* понимают сжимаемую жидкость, т. е. газ и пар.

Первый закон термодинамики для потока упругой (сжимаемой) среды

- Работа внешних сил, приложенных к движущейся упругой среде, и притекающая к ней извне теплота преобразуются в ее энергию.
- Энергия движущейся упругой среды складывается из кинетической энергии видимого движения среды и ее внутренней энергии.

В расчете на 1 кг газа:

$$dq + dl_{sd} + dl_{st} = du + dk = c_v dT + d(w^2/2)$$

Первый закон термодинамики для потока упругой (сжимаемой) среды

В расчете на 1 кг газа:

$$dq + dl_{sd} + dl_{st} = du + dk = c_v dT + d(w^2/2)$$

где dq — подведенное к 1 кг газа элементарное количество теплоты;

dl_{sd} — элементарная работа поверхностных деформирующих сил, уравновешенных относительно центра тяжести выделенного объема газа;

dl_{st} — элементарная работа транспортирующих поверхностных сил, , неуравновешенных относительно центра тяжести,

$du = c_v dT$ — элементарное изменение внутренней энергии выделенного объема;

$d(w^2/2) = dk$ — элементарное изменение кинетической энергии .

Первый закон термодинамики для потока упругой (сжимаемой) среды

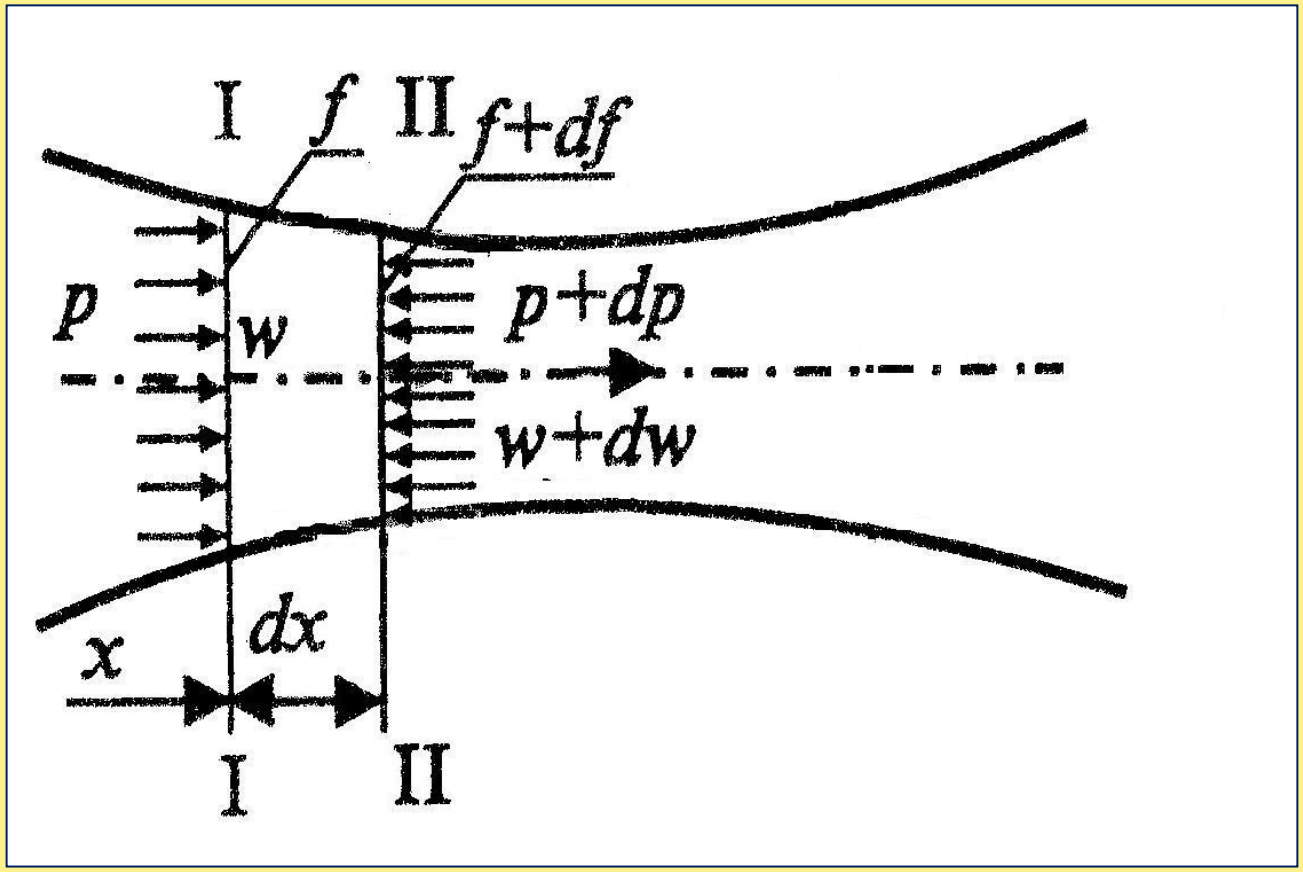
Рассмотрим сплошное, стационарное течение упругой среды в прямом канале с произвольным изменением по длине x площади поперечного сечения f.

Скорость движения в каждом сечении определяется из уравнения сплошности:

$$w = \frac{G\upsilon}{f}$$

где G, кг/с — массовый расход упругой среды, постоянный для всех сечений канала .

Установившееся течение газа в канале переменного сечения



Первый закон термодинамики для потока упругой (сжимаемой) среды

В расчете на 1 кг газа:

$$dq + dl_{sd} + dl_{st} = du + dk = c_v dT + d(w^2/2)$$

Без учета сил трения работа транспортирующих сил в расчете не на элементарную массу $Gd\tau$:

$$d^2L_{st} = pfwd\tau - (p + dp)(f + df)(w + dw)d\tau.$$

Произведя в правой части перемножение и отбросив величины высшего порядка малости, получим:

$$d^2L_{st} = -(pwdf + pfdw + fwdp)d\tau = -[pd(fw) + fwdp]d\tau$$

или с учетом условия сплошности ($Gdv = d(fw)$):

$$d^2L_{st} = -G(pdv + vdp)d\tau = -Gd(pv)d\tau.$$

Первый закон термодинамики для потока упругой (сжимаемой) среды

В расчете на 1 кг газа:

$$dq + dl_{sd} + dl_{st} = du + dk = c_v dT + d(w^2/2) \quad (8.1)$$

Удельная работа транспортирующих сил, т. е. в расчете не на элементарную массу $Gd\tau$, а на 1 кг рабочего тела:

$$dl_{st} = -d(pv).$$

Тогда уравнение (8.1) при отсутствии работы деформирующих сил ($dl_{sd} = 0$) можно переписать:

$$dq = du + d(pv) + d(w^2/2) = di + d(w^2/2). \quad (8.2)$$

Математическая формулировка первого закона термодинамики для покоящегося газа имеет вид:

$$dq = du + pdv. \quad (8.3)$$

Первый закон термодинамики для потока упругой (сжимаемой) среды

$$dq = du + d(pv) + d(w^2/2) = di + d(w^2/2). \quad (8.2)$$

Математическая формулировка первого закона термодинамики для покоящегося газа имеет вид:

$$dq = du + pdv. \quad (8.3)$$

Если из левой и правой частей уравнения (8.2) вычесть соответствующие части уравнения (8.3), получим так называемое уравнение Д. Бернулли:

$$vdp + d(w^2/2) = 0. \quad (8.4)$$

Уравнения (8.3)…(8.4) представляют собой математические формулировки закона сохранения и превращения энергии.

8.2. Скорость распространения звука в упругой среде. Числа M и λ

Скоростью звука называется скорость распространения малых возмущений в упругой среде.

Если где-нибудь в потоке газа скорость станет равна местной скорости звука, то такая скорость газа $w = a_к$ называется *критической*; критическими будут называться и соответствующие значения давления, плотности и температуры: $p_к$, $\rho_к$, $T_к$.

Скорость распространения звука в упругой среде. Числа M и λ

- Отношение скорости w движения газа в данной точке потока к соответствующей этой точке местной скорости звука , называется *числом* **M** (*числом Маха*).

$$M = \frac{w}{a}$$

M < 1 – поток дозвуковой,
M > 1 – поток сверхзвуковой.

Скорость распространения звука в упругой среде. Числа M и λ

- Отношение скорости потока в данной точке к одинаковой для всего потока в целом критической скорости $w/a_к = \lambda$ будем называть *скоростным коэффициентом*.

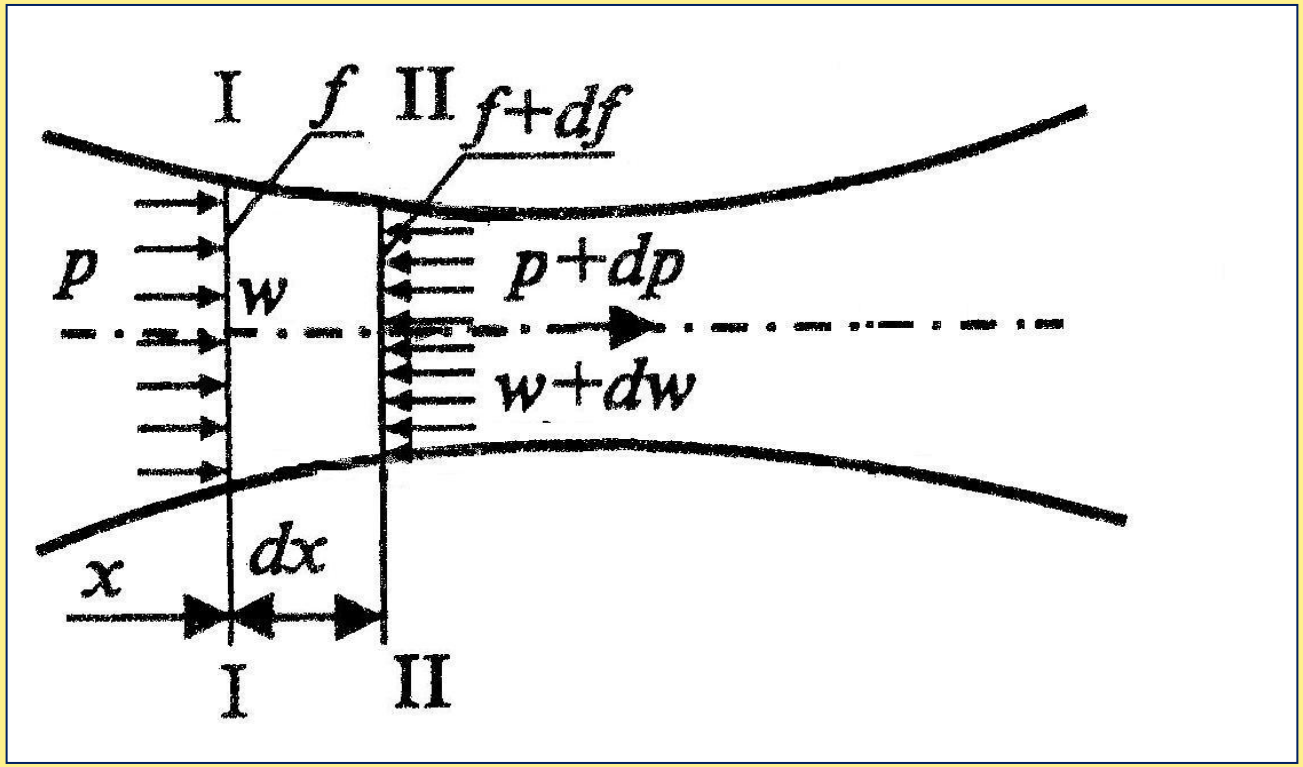
$$a = \sqrt{kp\upsilon}$$

- скорость распространения звука

$$a = \sqrt{kRT}$$

– скорость звука в идеальном газе

8.3. Движение газа в прямом канале переменного сечения



Движение газа в прямом канале переменного сечения

Скорость движения в каждом сечении определяется из уравнения сплошности:

$$w = \frac{G\upsilon}{f}$$

Продифференцируем уравнение сплошности :
$fdw + wdf = Gd\upsilon$ и разделим результат на $fw = G\upsilon$:

$$\frac{dw}{w} + \frac{df}{f} = \frac{d\upsilon}{\upsilon} \qquad (8.5)$$

Движение газа в прямом канале переменного сечения

Полагаем, что в процессе течения в канале параметры газа изменяются адиабатически: $pv^k = \text{const}$.

Отсюда после дифференцирования и разделения членов левой части на pv^k находим:

$$\frac{d\upsilon}{\upsilon} = -\frac{1}{k}\frac{dp}{p} \qquad (8.6)$$

Из уравнения Бернулли:

$$\frac{dw}{w} = -\frac{\upsilon}{w^2}dp \qquad (8.7)$$

Движение газа в прямом канале переменного сечения

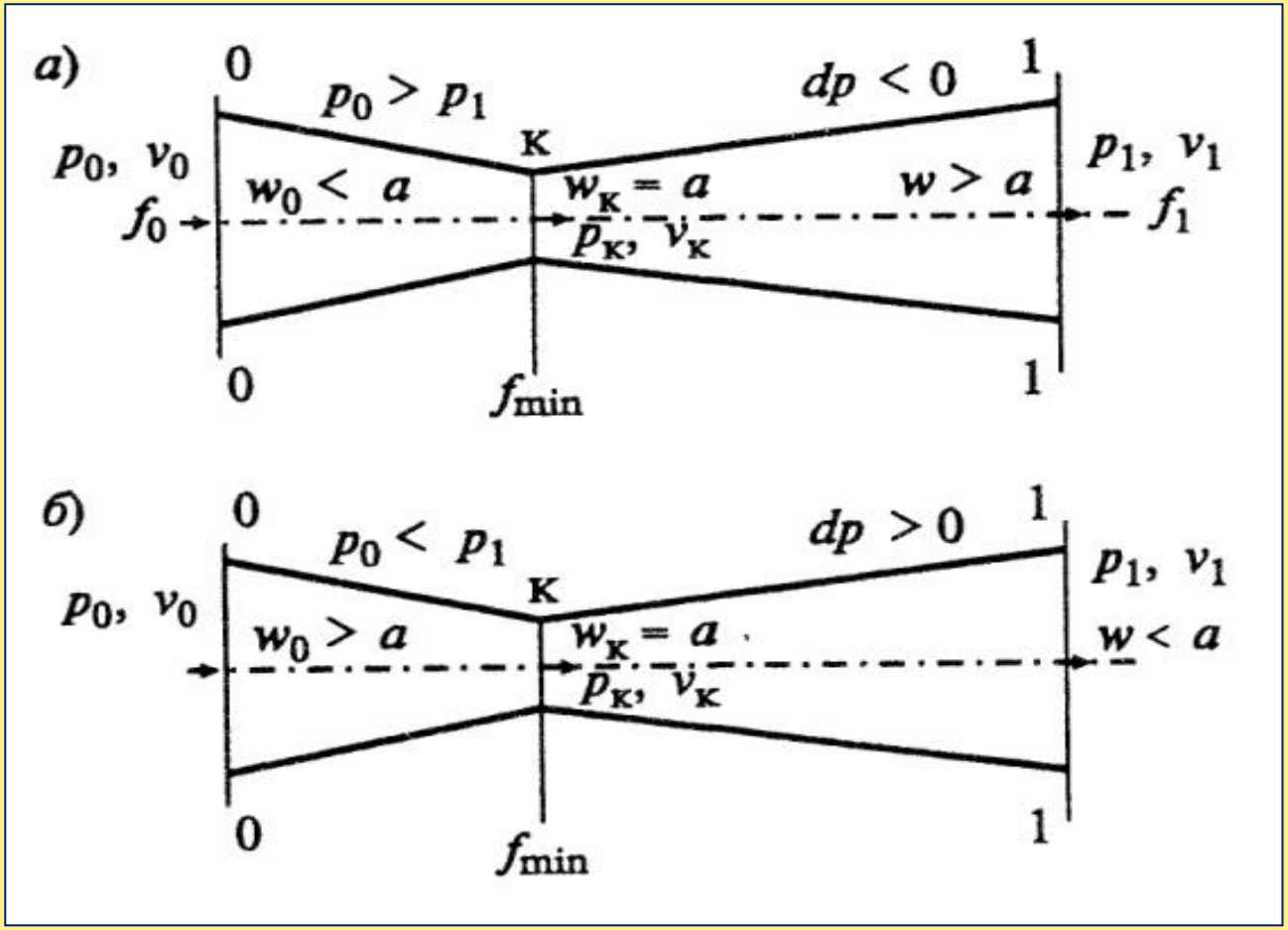
Подставляя выражения (8.6) и (8.7) в (8.5) , получим:

$$df = \frac{f}{kpw^2}\left(kp\upsilon - w^2\right)dp \qquad (8.8)$$

$a = \sqrt{kp\upsilon}$ - скорость звука

Течение с нарастающей скоростью возможно в направлении понижающегося давления ($dp < 0$), при этом пока $w < a$, площадь сечения канала также должна уменьшаться ($df < 0$).

Движение газа в прямом канале переменного сечения



а) в сопле,

б) в диффузоре

Движение газа в прямом канале переменного сечения

В минимальном сечении скорость потока достигает критического значения, равного скорости звука: $a = \sqrt{kp\upsilon}$

$$df = \frac{f}{kpw^2}\left(kp\upsilon - w^2\right)dp \qquad (8.8)$$

Для дальнейшего увеличения скорости течения в канале площадь его сечения теперь должна нарастать:

$dp < 0 \rightarrow df > 0$ в соответствии с уравнением (8.8)

Движение газа в прямом канале переменного сечения

Канал, по которому газ движется в направлении понижающегося давления с нарастающей скоростью, называется *соплом*.

Для достижения потоком сверхзвуковой скорости сопло должно быть сначала суживающимся, а затем расширяющимся (комбинированное сопло Лаваля). В сечении $f = f_{\min}$ достигается критическая скорость течения, равная скорости звука в текущем газе при параметрах его состояния именно в этом сечении.

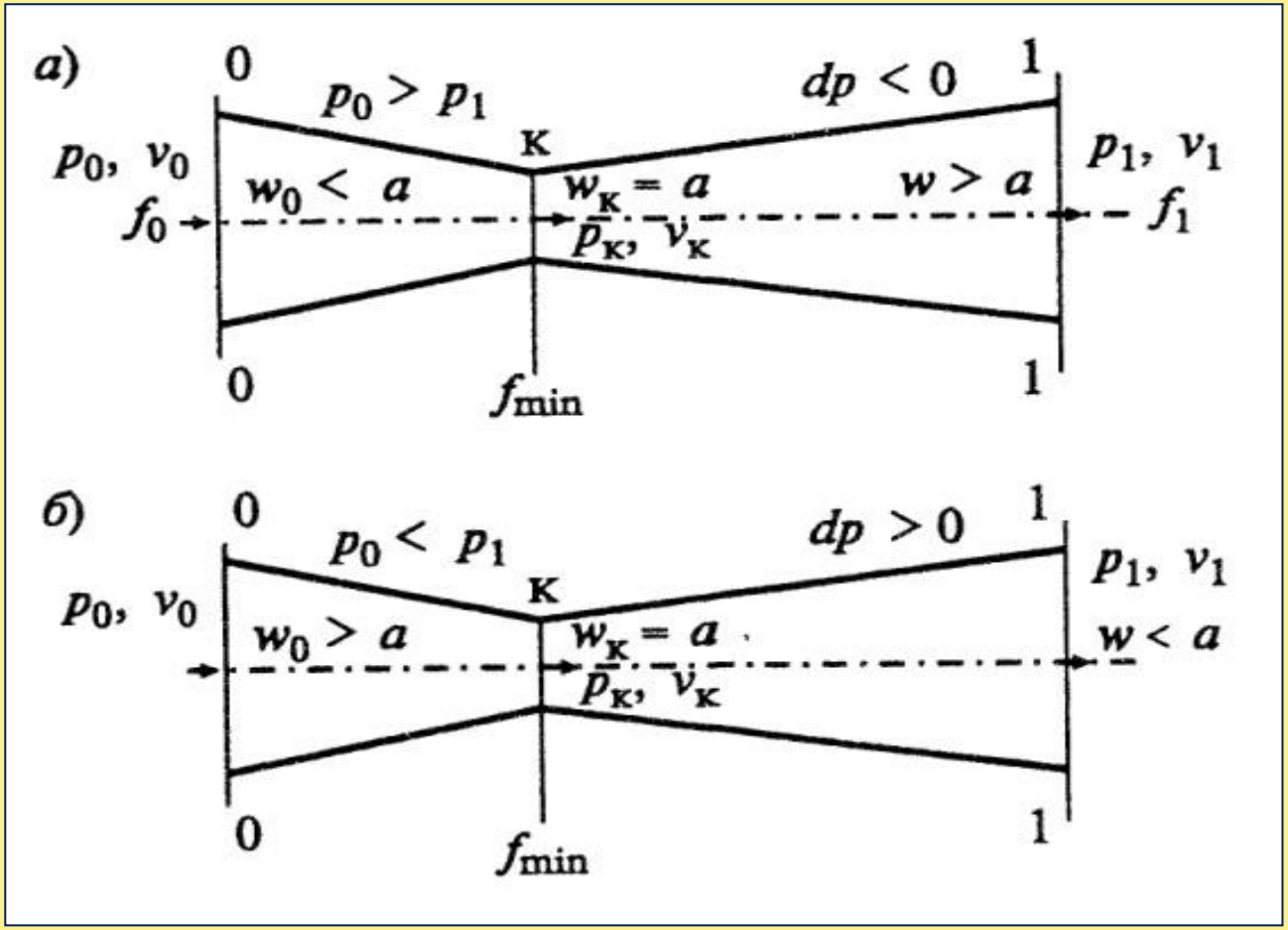
Движение газа в прямом канале переменного сечения

Канал, по которому газ движется в направлении повышающегося давления с понижающейся скоростью, называется *диффузором*.

В нем кинетическая энергия потока преобразуется в потенциальную энергию повышенного давления.

Скорость сверхзвукового потока в сечении $f = f_{min}$ падает до критического значения, равного скорости звука в текущем газе при параметрах его состояния именно в этом сечении.

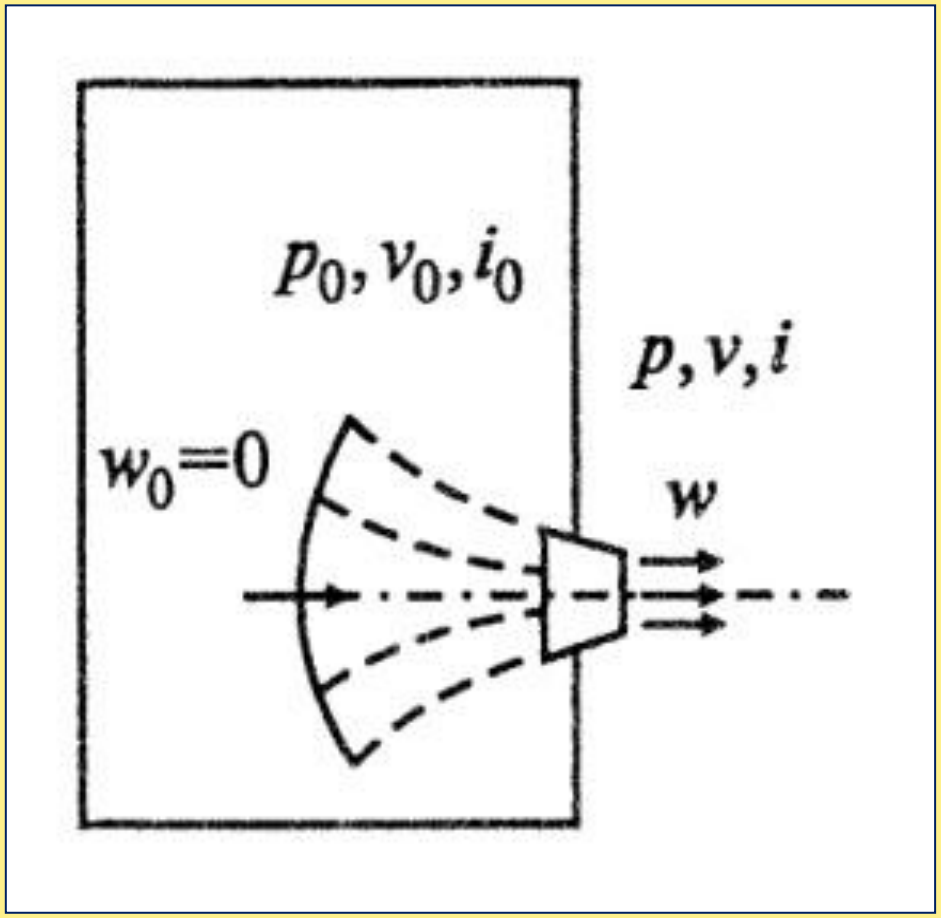
Движение газа в прямом канале переменного сечения



а) в сопле,

б) в диффузоре

8.4. Зависимость скорости истечения газа от перепада давления



1-й закон термодинамики:

$dq = du + d(pv) + d(w^2/2) =$

$= di + d(w^2/2)$ (8.3)

Проинтегрируем уравнение с учётом $dq = 0$ и $w_0 = 0$:

$$w = \sqrt{2(i_0 - i)}$$

Зависимость скорости истечения газа от перепада давления

Проинтегрируем уравнение Бернулли $\upsilon dp + d(w^2/2) = 0$:

$$\frac{w^2 - w_0^2}{2} = \int_{p_0}^{p} \upsilon dp$$

с учётом $w_0 = 0$ и $p_0\upsilon_0^k = p\upsilon^k = \text{const} = c$, получим:

$$w = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_0\upsilon_0\left(1 - \beta^{(k-1)/k}\right)}$$, где $\beta = p/p_0$.

Зависимость скорости истечения газа от перепада давления

Когда газ истекает в вакуум ($\beta = 0$) :

$$w_{\max} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_0 \upsilon_0}$$

Определим отношение давления $\beta_к$, при котором скорость истечения достигает критического значения $w_к = a = \sqrt{k p_к \upsilon_к}$

$$w_к = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_0 \upsilon_0 \left(1 - \beta_к^{(k-1)/k}\right)} = \sqrt{k p_к \upsilon_к}$$

Зависимость скорости истечения газа от перепада давления

Откуда критическое отношение давлений :

$$\beta_к = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}$$

Критическая скорость истечения:

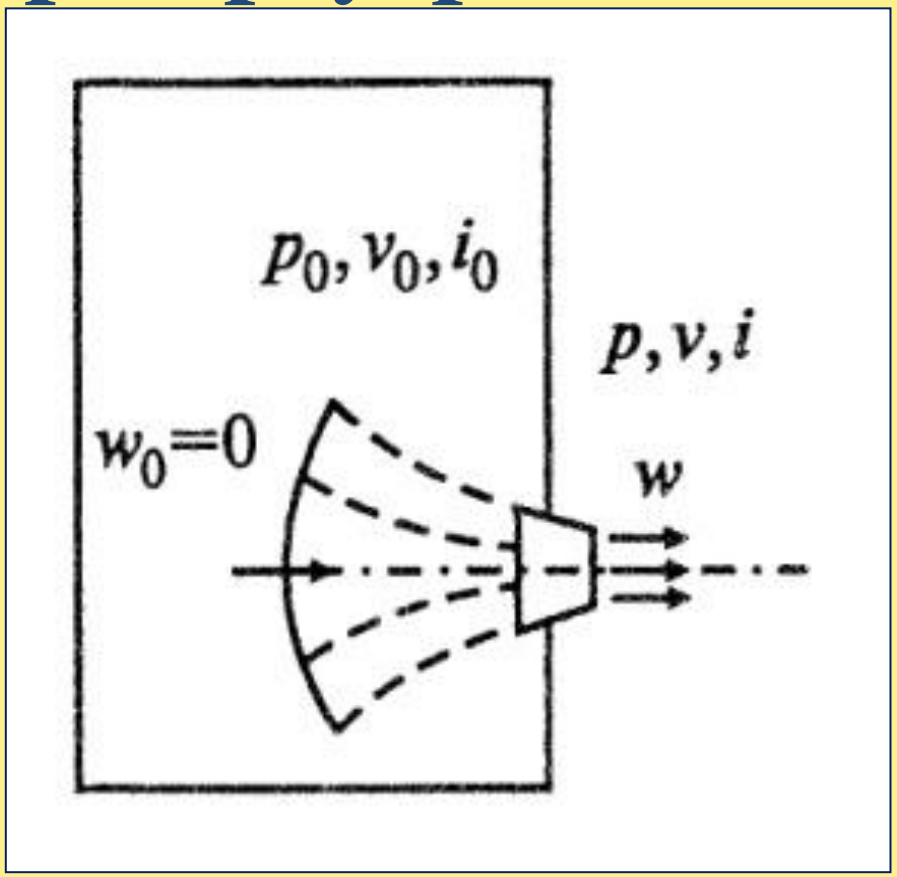
$$w_к = \sqrt{\frac{2k}{k+1} p_0 \upsilon_0} = \alpha\sqrt{p_0\upsilon_0}$$

где $\alpha = \sqrt{\frac{2k}{k+1}}$

Значения констант истечения для различных газов

Рабочее тело	k	$\beta_к$	α	γ
Газ двухатомный	1,40	0,528	1,076	0,684
Перегретый пар	1,30	0,546	1,059	0,667
Сухой насыщенный водяной пар (от 0 до 150 °С)	1,135	0,577	1,028	0,634

8.5. Расход газа при истечении из резервуара



Расход G, (кг/с) определится из уравнения сплошности:

$$G = f\frac{w}{\upsilon}$$

С учётом уравнения адиабаты: $\upsilon = \upsilon_0 \beta^{-1/k}$

получим:

$$G = f_{\min}\sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{p_0}{\upsilon_0}\left(\beta^{2/k} - \beta^{(k+1)/k}\right)}$$

Расход газа при истечении из резервуара

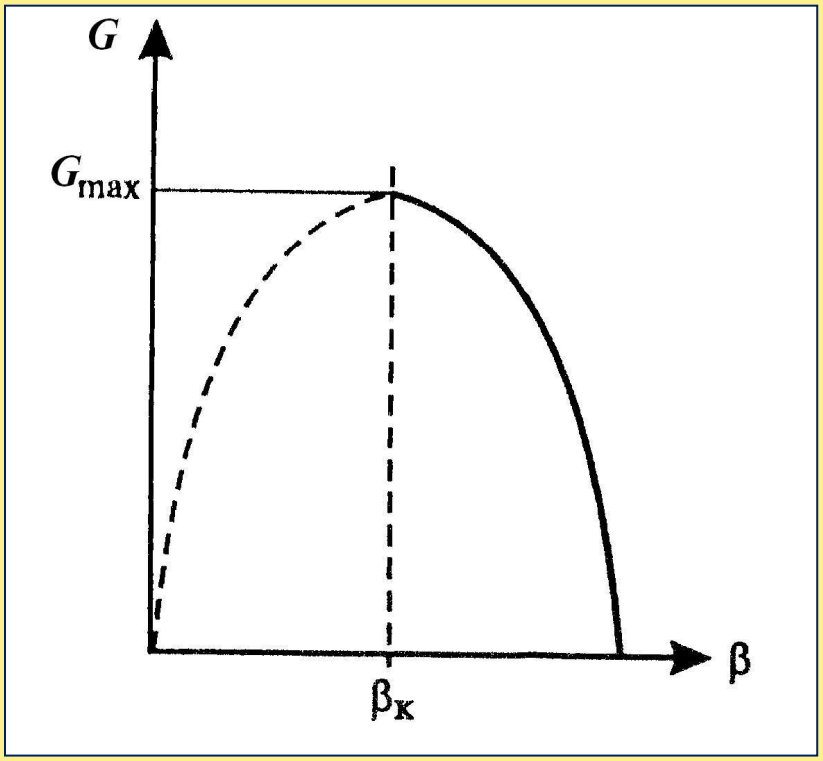
При достижении $\beta=\beta_к$ и критической скорости истечения расход газа достигает максимального значения и с дальнейшим уменьшением β не возрастает. Это относится и к истечению газа из Сопла Лаваля (иначе нарушается уравнение сплошности).

Следовательно, максимальный расход газа :

$$G_{\max} = f_{\min}\sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{p_0}{\upsilon_0}\left(\beta_к^{2/k} - \beta_к^{(k+1)/k}\right)}$$

Расход газа при истечении его из резервуара или через сопло Лаваля

или $$G_{max} = f_{min}\sqrt{\frac{p_0}{\upsilon_0}}\sqrt{k\left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/(k-1)}} = f_{min}\gamma\sqrt{\frac{p_0}{\upsilon_0}}$$



Формула действительна лишь для $\beta > \beta_{к.}$

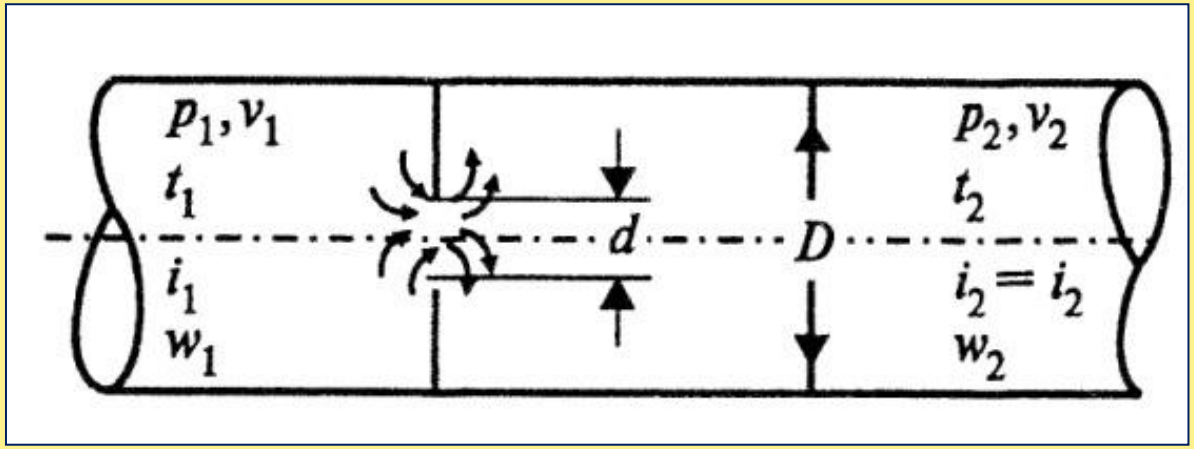
Где

$$\gamma = \sqrt{k\left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/(k-1)}}$$

Значения констант истечения для различных газов

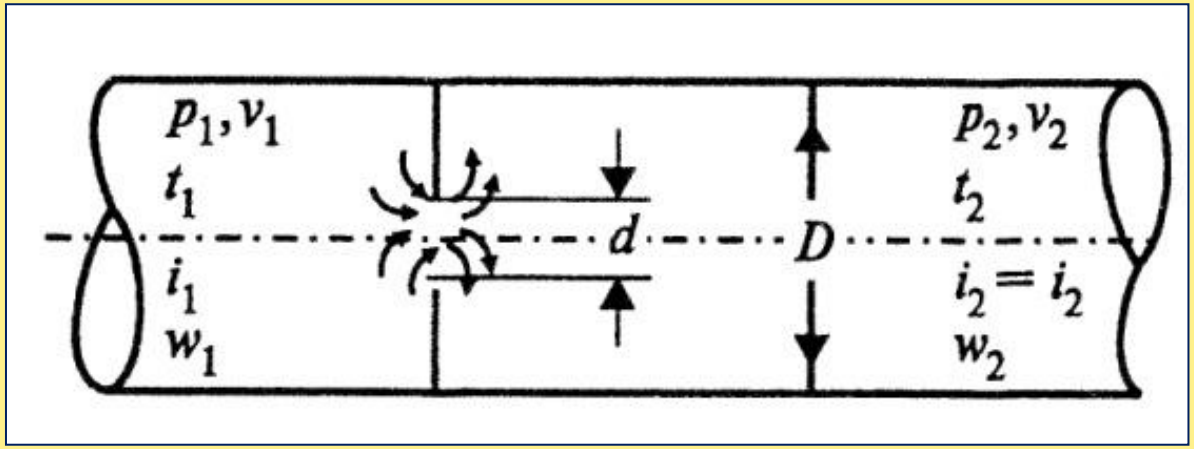
Рабочее тело	k	$\beta_к$	α	γ
Газ двухатомный	1,40	0,528	1,076	0,684
Перегретый пар	1,30	0,546	1,059	0,667
Сухой насыщенный водяной пар (от 0 до 150 °С)	1,135	0,577	1,028	0,634

8.6. Дросселирование



Дросселированием называется процесс понижения давления в канале постановкой перегородки с отверстием, эквивалентный диаметр d которого значительно меньше эквивалентного диаметра D канала.

Дросселирование



$w_1 = w_2$, $T1 \approx T2$, $p_1 v_1 = p_2 v_2$ ➡

$$\Delta i_{1\to 2} = c_\upsilon (T_1 - T_2) + (p_2\upsilon_2 - p_1\upsilon_1) = 0 \Rightarrow i = const$$

Контрольные вопросы и задания к главе 8

1. Сформулировать и написать уравнение первого закона термодинамики для потока упругой среды.
2. Каким должен быть канал, скорость течения газа в котором может превысить звуковую?
3. Как определить скорость звука в газе с определенными параметрами состояния?
4. Как определить скорость истечения газа через насадку из резервуара большого объема?
5. Что называется соплом и диффузором?

Контрольные вопросы и задания к главе 8

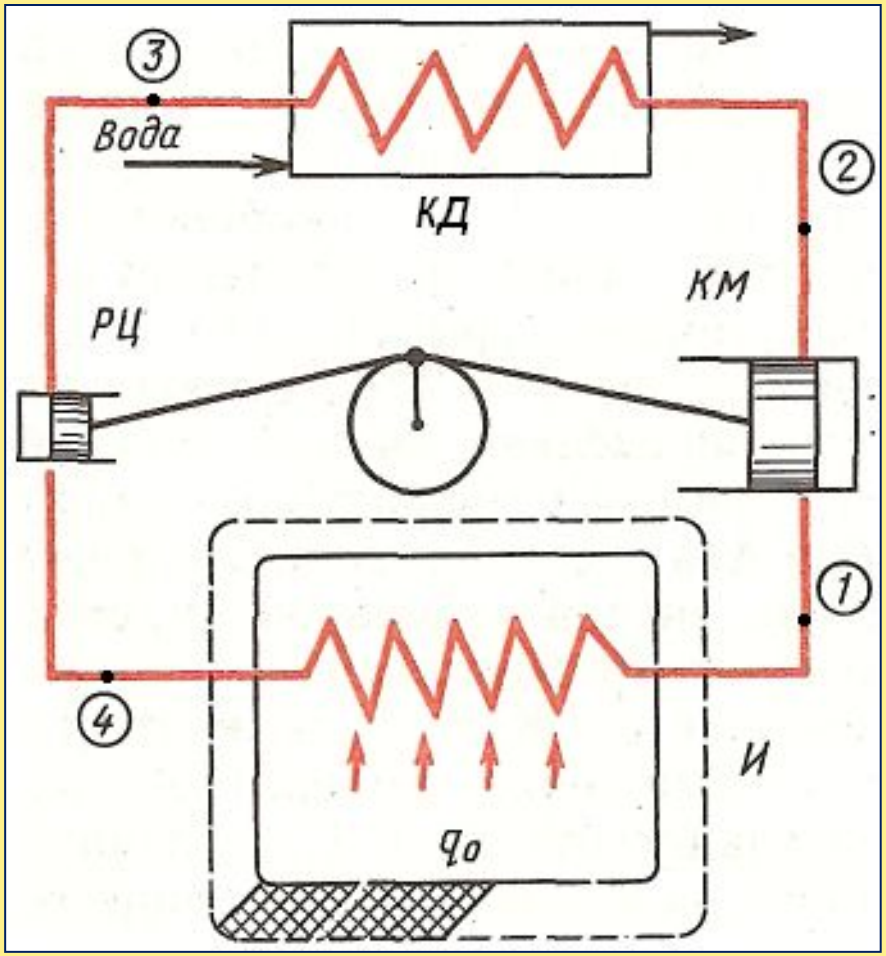
6. Что называется критическим отношением давлений при истечении газа из резервуара и как оно определяется?
7. Как определяется расход газа при истечении его через насадку из резервуара большого объема?
8. Как определяется действительная скорость газа при истечении его через насадку из резервуара большого объема?
9. Что представляет собой процесс дросселирования?

Глава 9. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

9.1. Обратный цикл Карно

Цикл холодильной установки является обращенным циклом теплового двигателя (т. е. развивающимся против часовой стрелки).

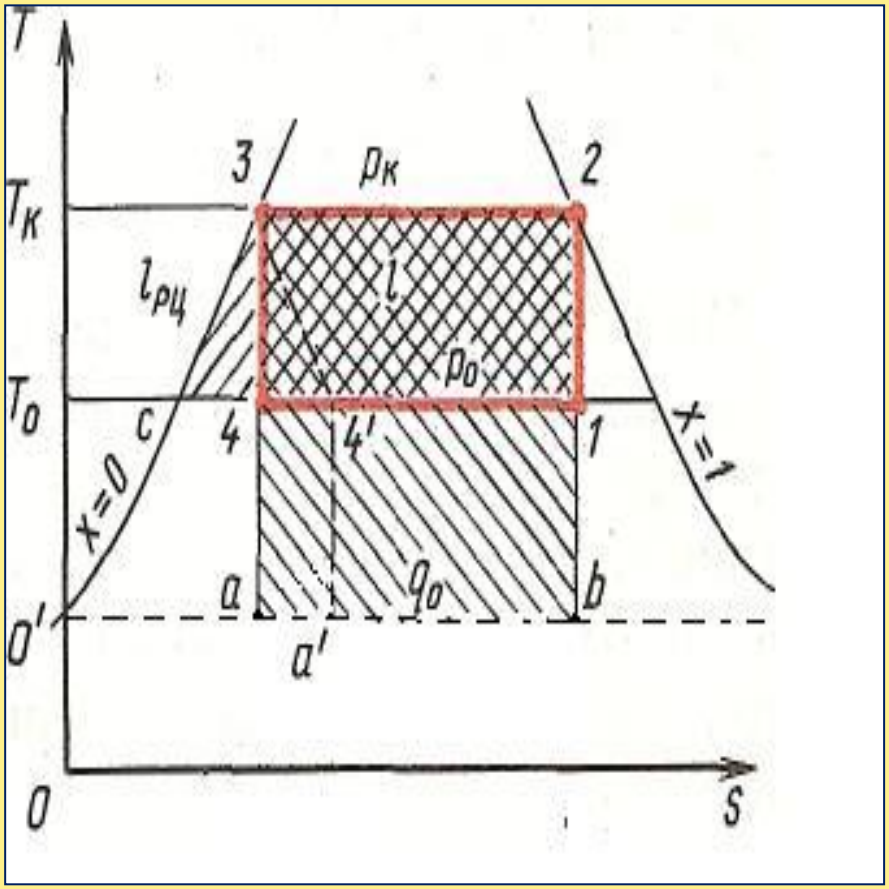
Обратный цикл Карно



И –испаритель
КМ – компрессор
РЦ-расширительный цилиндр
КД – конденсатор

1. влажный насыщенный пар при температуре T_1
2. сухой насыщенный пар при температуре T_2
3. жидкость при температуре T_2
4. двухфазная смесь при температуре T_1

Обратный цикл Карно



1-2 – адиабата сжатия
2-3 - конденсация
3-4 – адиабата расширения
4-1 -испарение

1. Влажный пар при температуре T_1
2. сухой насыщенный пар при температуре T_2
3. жидкость при температуре T_2
4. двухфазная смесь при температуре T_1

Обратный цикл Карно

Количество теплоты q_0, отводимое от охлаждаемого объекта единицей массы хладагента, называется *его удельной массовой холодопроизводительностью:*

$$q_0 = i_1 - i_4 = r_1(x_1 - x_4)$$

где r_1 — удельная теплота парообразования при температуре $T_0 = T_4 = T_1$.

Удельное количество теплоты, отводимое в конденсаторе : $q_к = i_2 - i_3 = r_2$

Удельная работа l_0, затрачиваемая на адиабатное сжатие 1 кг паров холодильного агента: $l_0 = i_2 - i_1$.

Полезная работа, совершаемая расширительным цилиндром : $l_{РЦ} = i_3 - i_4$.

Обратный цикл Карно

Тогда затраты удельной работы на совершение цикла Карно :

$$l = l_0 - l_{РЦ} = i_2 - i_3 - (i_1 - i_4) = q_к - q_0,$$

следовательно, удельное количество теплоты, отводимое в конденсаторе: $q_к = q_0 + l.$

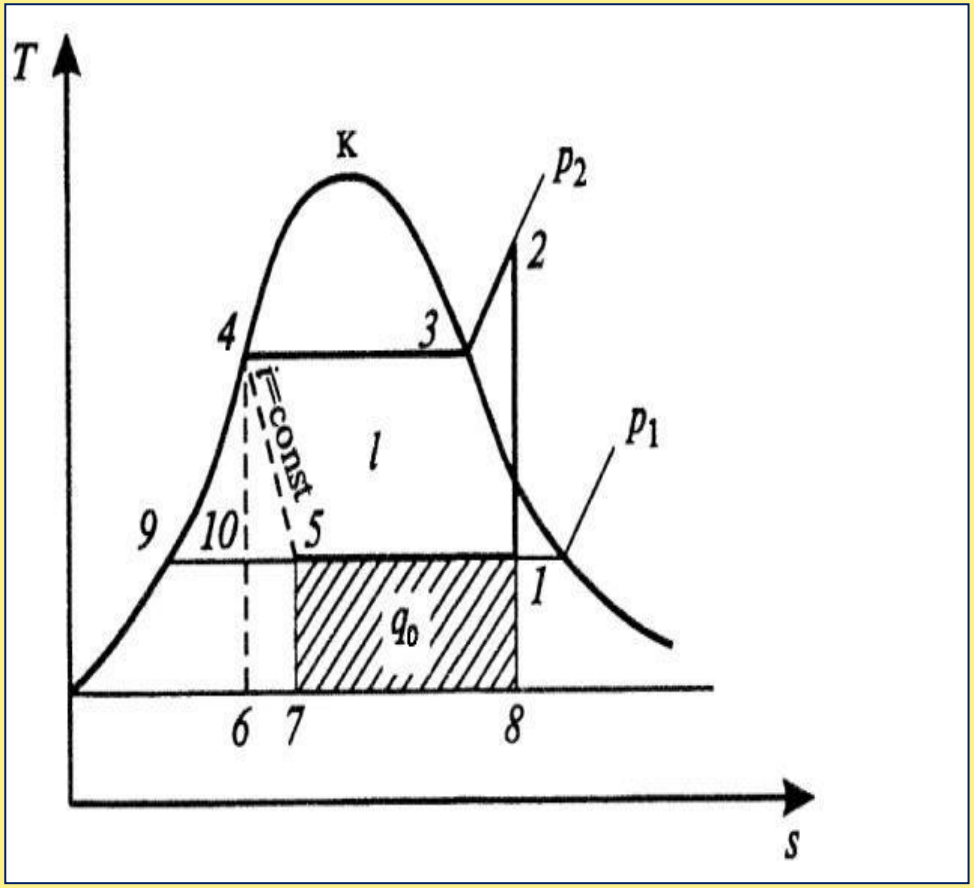
Холодильный коэффициент:

$$\varepsilon = q_0 / l = \frac{T_0(s_1 - s_4)}{T_к(s_2 - s_3) - T_0(s_1 - s_4)}$$

Учитывая, что , $s_2 - s_3 = s_1 - s_4$:

$$\varepsilon = T_0/(T_к - T_0)$$

9.2. Цикл компрессорной паровой холодильной установки



1-2 – адиабата сжатия

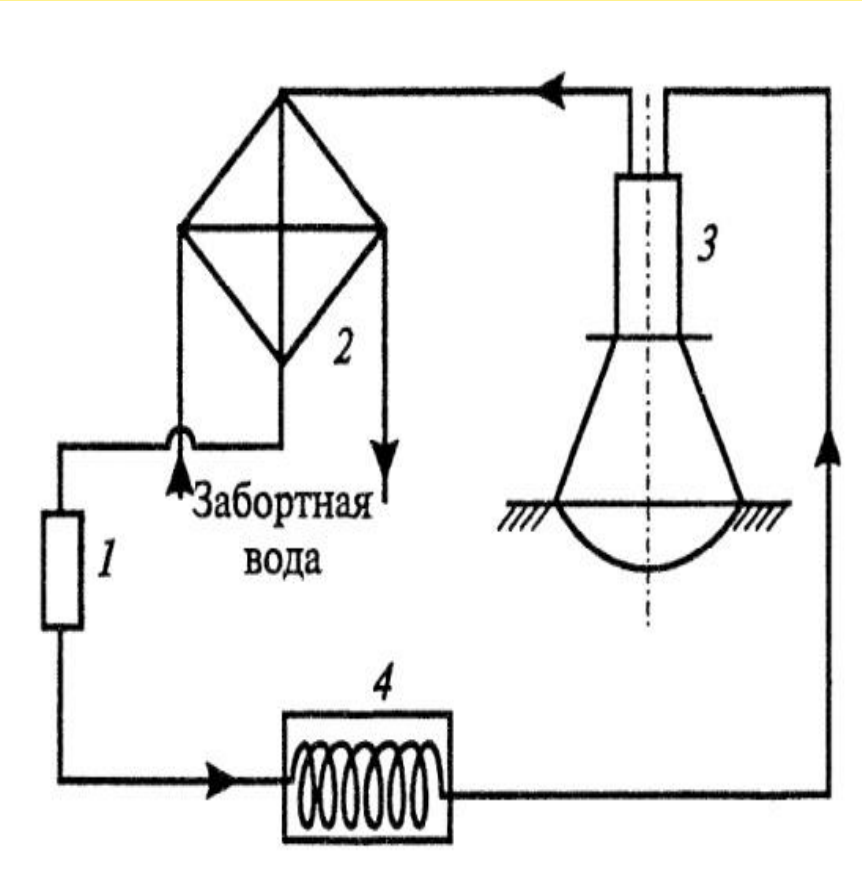
2-3 – охлаждение пара до температуры насыщения

3-4 – конденсация

4-5 - дросселирование

5-1 -испарение.

Схема парокомпрессорной холодильной установки



1 - дроссельный клапан

2 – конденсатор

3 – компрессор

4 –испаритель

Цикл компрессорной паровой холодильной установки

Удельная холодопроизводительность: $q_0 = i_1 - i_5$

Удельное количество теплоты, отводимое в конденсаторе : $q_k = i_2 - i_4$

Удельная работа l_0, затрачиваемая на адиабатное сжатие 1 кг паров в компрессоре: $l_ц = i_2 - i_1$.

Холодильный коэффициент установки:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_ц} = \frac{i_1 - i_5}{i_2 - i_1}$$

Дросселирование (процесс *4–5*) снижает эффективность холодильной установки, однако позволяет регулировать режим её работы.

Контрольные вопросы и задания к главе 9

1. Что представляет собой обратный цикл Карно и в какой схеме установки он может быть реализован?
2. Описать цикл компрессорной паровой холодильной установки, нарисовать ее схему.
3. Что называется холодильным коэффициентом и холодопроизводительностью холодильной установки?
4. Какие рабочие тела используются в современных холодильных установках и каким требованиям они должны удовлетворять?
5. Как маркируются фреоны?
6. Назвать преимущества и недостатки фреонов как рабочего тела в холодильных установках.

Глава 10.
ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

10.1. Термодинамические характеристики газовых смесей

Газовой смесью называется смесь газов, компоненты которых не вступают в химические реакции.

Закон Дальтона:

$p_c = p_1 + p_2 + \ldots + p_n$

где p_c — давление смеси; $p_1, p_2, \ldots, p_n$ — парциальные давления каждого из газов, входящих в смесь.

Термодинамические характеристики газовых смесей

Каждый из входящих в смесь объемом V_c газов занимает весь объем со своим парциальным давлением, и для него справедливо уравнение состояния:

$$p_i V_c = M_i R_i T_c,$$

где M_i — массовое содержание i-го газа в смеси; R_i — газовая постоянная этого газа.

$$V_c \sum_n p_i = T_c \sum_n M_i R_i$$

Уравнение состояния смеси:

$$p_c V_c = M_c R_c T_c$$

Термодинамические характеристики газовых смесей

Масса смеси: $\mathrm{M_c} = \sum_n \mathrm{M}_i$

Газовая постоянная смеси: $R_\mathrm{c} = \sum_n m_i R_i$

где $m_i = \mathrm{M}_i/\mathrm{M_c}$ — массовая доля каждого компонента в смеси газов.

Парциальное давление: $p_i = p_\mathrm{c} m_i \dfrac{R_i}{R_\mathrm{c}} = p_\mathrm{c} \dfrac{m_i R_i}{\sum_n m_i R_i}$

Относительный парциальный объем : $r_i = V_i/V_\mathrm{c}$, тогда по уравнению Бойля—Мариотта (при $T = T_\mathrm{c}$): $p_i = r_i p_\mathrm{c}$.

Мольная доля газа: $v_i = n_i/n_\mathrm{c}$, $\sum_n n_i = n_\mathrm{c}$

Термодинамические характеристики газовых смесей

Объемы одного моля V_μ всех газов при одинаковых давлении и температуре одинаковы.
Поэтому относительное мольное содержание i-го газа в смеси равно его относительному объемному содержанию:

$$\nu_i = n_i / n_c = \frac{V_\mu n_i}{V_\mu n_c} = \frac{V_i}{V_c} = r_i$$

Молекулярная масса смеси:

$$\mu_c = \nu_1\mu_1 + \nu_2\mu_2 + \boxtimes + \nu_n\mu_n = \sum_n \nu_i\mu_i = \sum_n r_i\mu_i$$

Массовая теплоемкость смеси

$$c_c = m_1c_1 + m_2c_2 + \boxtimes + m_nc_n = \sum_n m_ic_i$$

10.2. Атмосферный воздух как газовая смесь

$$\mu_в = 0{,}79\mu_{N_2} + 0{,}21\mu_{O_2} = 29 \quad \text{кг/кмоль.}$$

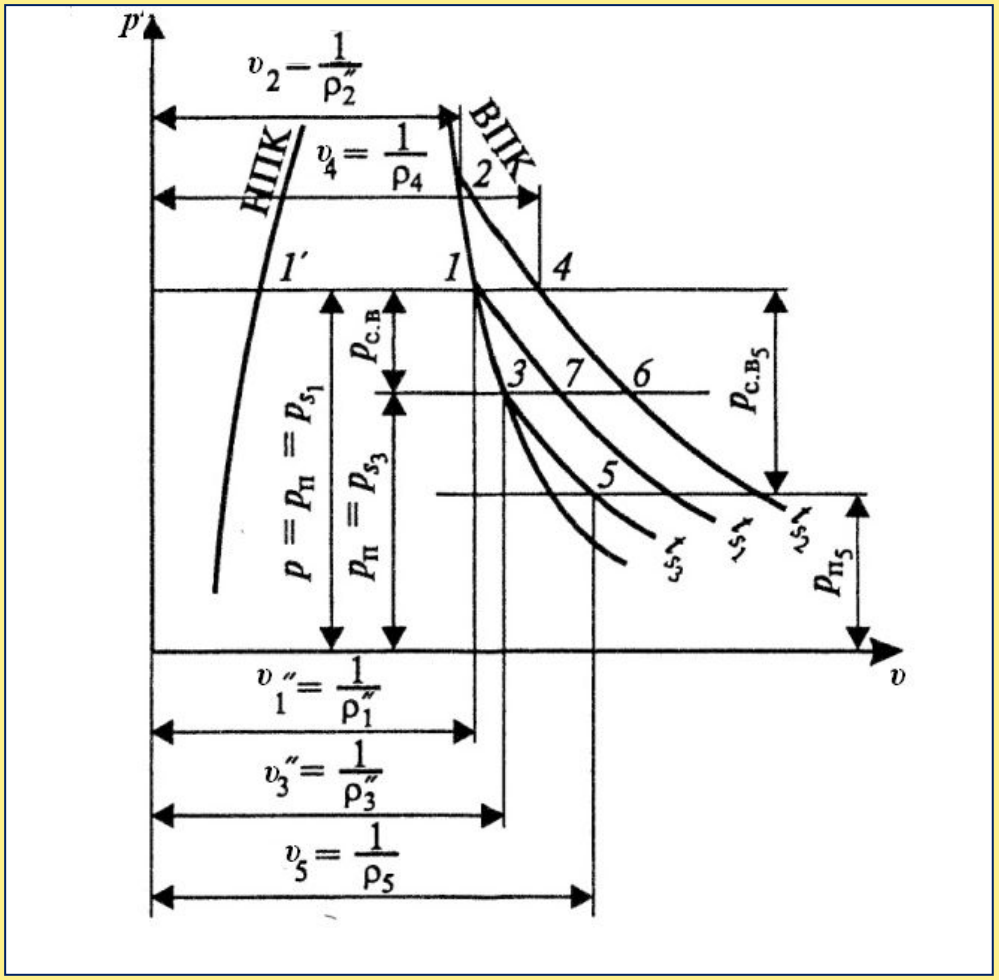
Влажный воздух рассматривают как газовую смесь сухого воздуха и пара: $p = p_{с.в.} + p_{п.}$

Абсолютной влажностью называется массовое содержание пара в 1 м^3 воздуха. Численно она равна плотности пара $\rho_п$ при парциальном давлении $p_п$.

Относительной влажностью называется отношение абсолютной влажности ненасыщенного воздуха к его максимальной абсолютной влажности при той же температуре:

$$\varphi = \left.\frac{\rho_п}{\rho_{max}}\right|_т = \left.\frac{\rho_п}{\rho''_s}\right|_т$$

Состояния водяного пара во влажном воздухе



1,2 – сухой насыщенный пар

4 – перегретый пар

Если температура среды Тз ниже температуры насыщения, то часть пара конденсируется, при этом парциальное давление пара понижается:

$$p_{s_1} = p_{s_3} + p_{\text{с.в.}}$$

Состояния водяного пара во влажном воздухе

Абсолютная влажность зависит не от общего давления в среде (p), а от парциального давления пара ($p_{п}$) и температуры.

При определенной температуре максимальная абсолютная влажность достигается при парциальном давлении пара, равном давлению насыщения, соответствующему данной температуре (точки *1, 2, 3).*

Если при этом общее давление среды:

$p = p_{п} = p_{s}$ - сухой насыщенный пар

$p = p_{п} < p_{s}$ – перегретый пар

$p = p_{п} + p_{с.в}$ – влажный воздух.

Состояния водяного пара во влажном воздухе

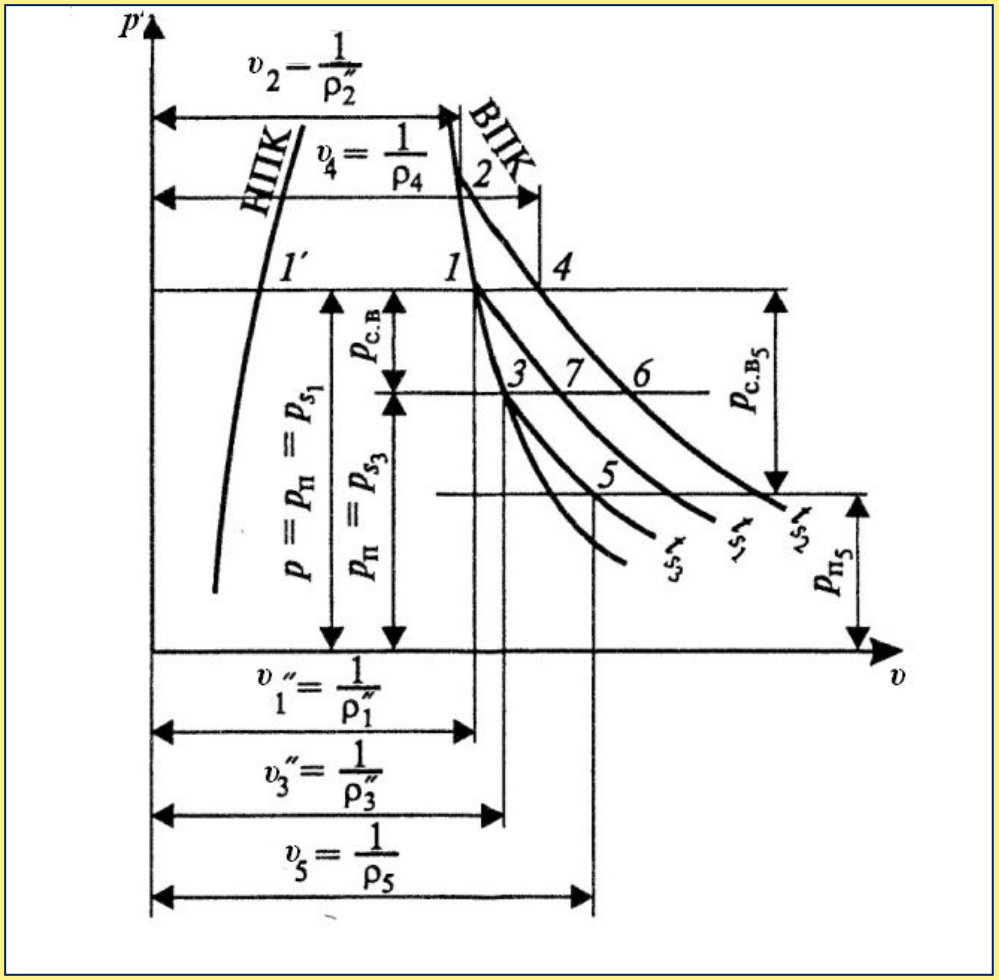
Если общее давление среды p больше парциального давления пара $p_{\text{п}}$, и парциальное давление пара при этом равно давлению насыщения при температуре среды, последнюю называют *насыщенным влажным воздухом*.

Насыщенный влажный воздух имеет максимальную (при данной температуре) абсолютную влажность.

Относительной влажностью называется отношение абсолютной влажности ненасыщенного воздуха к его максимальной абсолютной влажности при той же температуре:

$$\varphi = \left.\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\max}}\right|_{\text{т}} = \left.\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho''_s}\right|_{\text{т}}$$

Состояния водяного пара во влажном воздухе



Влажный воздух с некоторым значением относительной влажности

$$\varphi_6 = p_6 / p_{s_2}\Big|_{T s_2}$$

понижением его температуры (6→3) также можно привести в состояние влажного насыщенного воздуха

$$\varphi_3 = p_п / p_{s_3} = 1$$

Состояния водяного пара во влажном воздухе

Состояние, при котором парциальное давление пара равно давлению насыщения, соответствующему температуре влажного воздуха, называется *точкой росы*, а температура, при которой наступает это состояние называется *температурой точки росы* ($T_З = T_{sЗ}$).

Влагосодержанием воздуха d называют массу пара, приходящуюся на 1 кг сухого воздуха или на (1 + *d*) кг влажного воздуха.

Для некоторого объема *V* влажного воздуха:

$$d = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{с.в.}}} = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{с.в.}}}$$

Состояния водяного пара во влажном воздухе

Разделим почленно одно на другое два уравнения состояния для массы сухого воздуха $m_{с.в.}$ и водного пара $m_{п}$, входящих в объем V влажного воздуха:

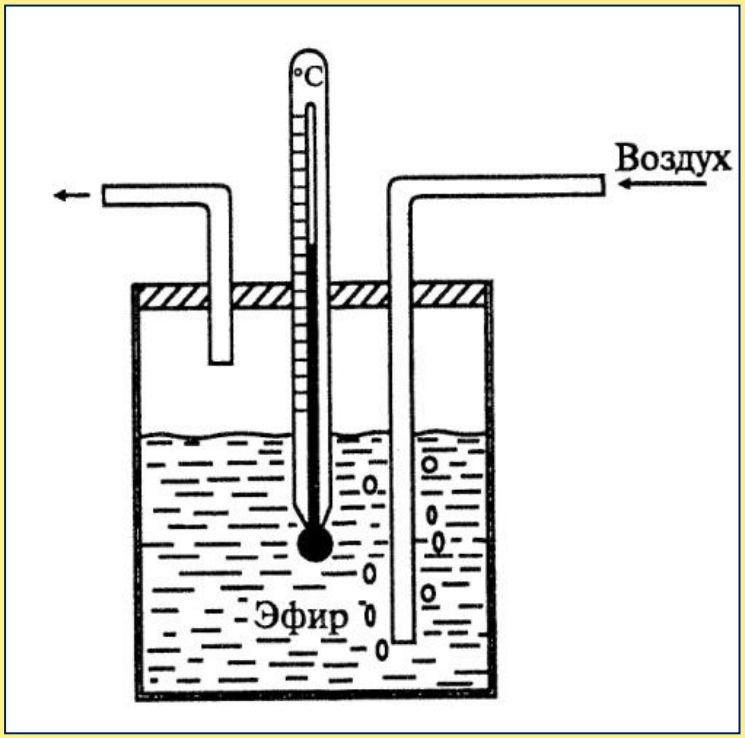
$$\frac{Vp_{с.в.}}{Vp_{п}} = \frac{m_{с.в.}R_{с.в.}}{m_{п}R_{п}} = \frac{m_{с.в.} \cdot 287}{m_{п} \cdot 461} = \frac{0{,}622}{d}$$

Отсюда с учетом $p_{с.в} = p - p_{п}$, получим: $$d = \frac{0{,}622\,p_{п}}{p - p_{п}}$$

Следовательно, с увеличением парциального давления пара влагосодержание воздуха увеличивается.

10.3. Способы определения относительной влажности. Диаграмма *i–d*

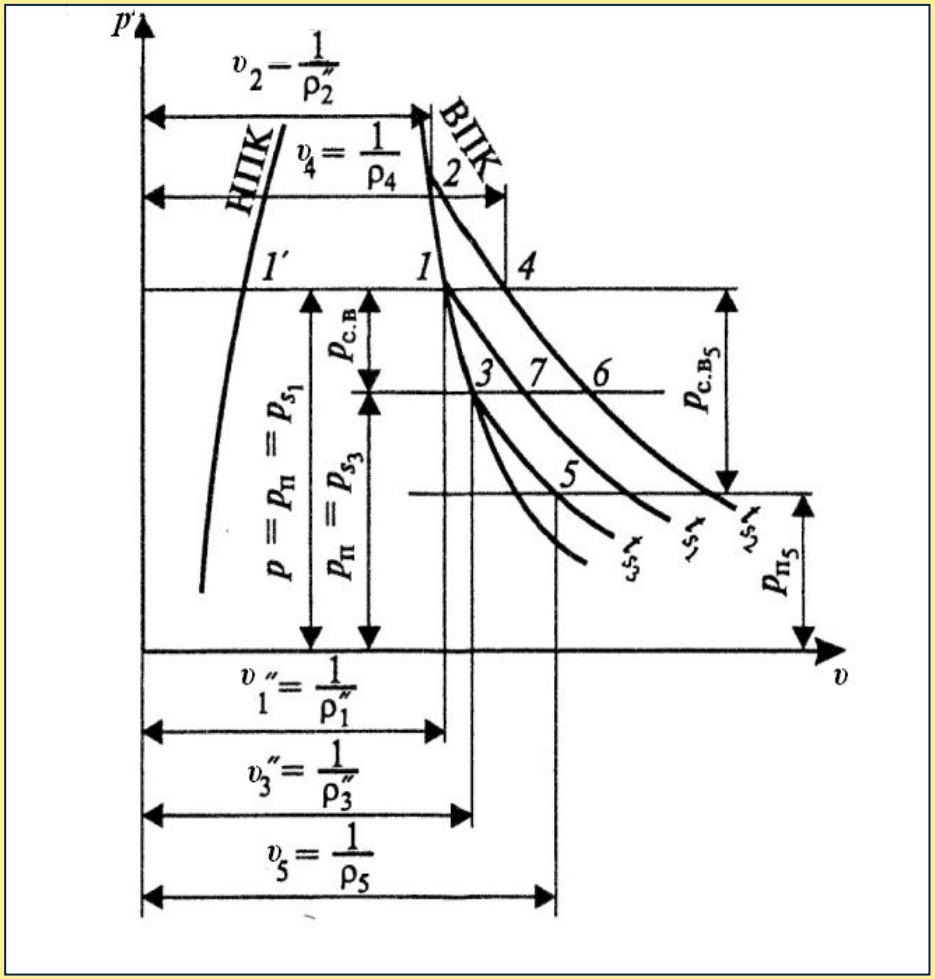
Гигрометр



Металлический тонкостенный цилиндр, заполненный эфиром, прокачивается воздухом. Часть эфира при этом испаряется, что понижает его температуру.

Температура, при которой на наружной поверхности цилиндра появляется роса, является температурой точки росы для окружающего гигрометр влажного воздуха.

Гигрометр



На p–v-диаграмме отмечаются точки (*7* — по термометру в воздухе и *3* — по термометру в эфире), полностью определяющие все характеристики влажного воздуха: $p_п$; $p_п + p_{с.в} = p$ (по барометру); ρ_7;

$$\varphi = \frac{\rho_7}{\rho_1''} = \frac{\rho_7}{\rho_1} = \frac{p_п}{p_s}\Big|_т \qquad d = \frac{0{,}622\,p_п}{p_{с.в.}}$$

Психрометр

Психрометр состоит из двух термометров: сухого и смоченного. Головка с ртутью смоченного термометра обернута тонким слоем ткани, к которой по фитилю непрерывно поступает вода. Влажность определяется по разности показаний сухого и смоченного термометров. Если влажный воздух не насыщен, вода с поверхности ткани испаряется и смоченный термометр показывает более низкую температуру, чем сухой. Характеристики влажного воздуха определяются аналогично предыдущему случаю.

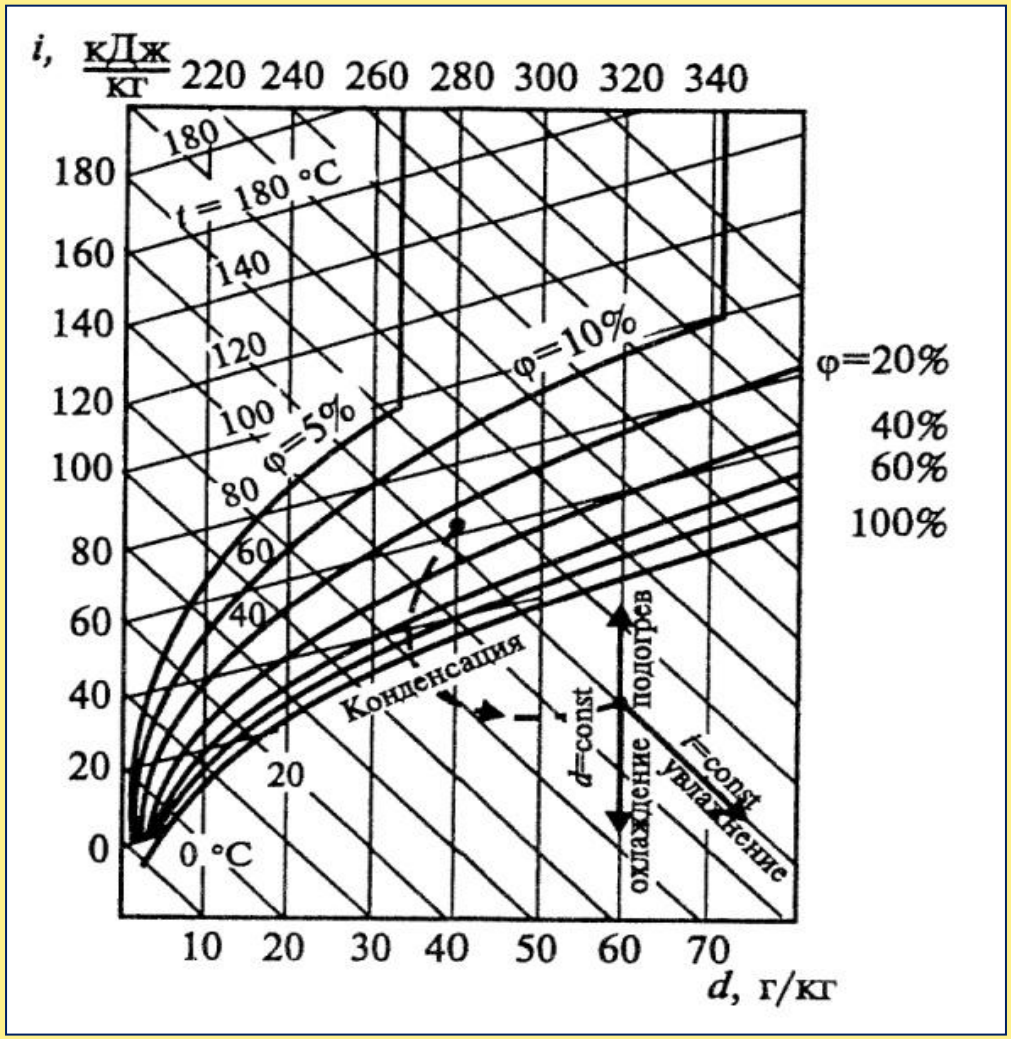
Характеристики влажного воздуха

Газовая постоянная влажного воздуха $R = \frac{8314}{\mu_с} = \frac{8314}{r_{с.в.}\mu_{с.в.} + r_п\mu_п}$

где $r_{с.в.}$ и $r_п$ — объемные доли сухого воздуха и пара соответственно; $\mu_{с.в.}$ и $\mu_п$ — молекулярные массы сухого воздуха (29 кг/кмоль) и пара (18 кг/кмоль) соответственно.

Энтальпия $(1 + d)$ кг влажного воздуха: $i = i_{с.в.} + d\, i_п$.
Или: $i = t + (2500 + 2t_s)d$.

Диаграмма i-d влажного воздуха



На диаграмме нанесены изотермы и линии постоянной относительной влажности φ. Прямые постоянной энтальпии проходят по отношению к своей оси под углом 135° для удобства.

Контрольные вопросы и задания к главе 10

1. Что называется газовой смесью в технической термодинамике?
2. Сформулировать закон Дальтона для газовых смесей.
3. Что представляет собой атмосферный воздух как газовая смесь?
4. Что называется абсолютной влажностью, относительной влажностью, влагосодержанием атмосферного воздуха?
5. Какое состояние называется «точкой росы»?
6. Как определяется энтальпия атмосферного воздуха?
7. Назвать основные термодинамические процессы в атмосферном воздухе в диаграмме $i–d$.
8. Описать практические способы определения относительной влажности атмосферного воздуха.