

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Курганский государственный университет»  
Кафедра «Энергетика и технология металлов»

## **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

Методические указания  
для бакалавров направлений 13.03.01, 13.03.02

Курган 2021

Кафедра: «Энергетика и технология металлов».

Дисциплина: «Техническая термодинамика» (направления 13.03.01,13.03.02).

Составил: канд. техн. наук, доцент В. А. Савельев.

Печатается в соответствии с планом издания, утвержденным методическим советом университета «10» декабря 2020 г.

Утверждены на заседании кафедры «4» апреля 2021 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Теплота занимает важное место в жизнедеятельности человека. Получение, преобразование и использование тепловой энергии возможно только при знании законов технической термодинамики.

Дисциплина «*Техническая термодинамика*» знакомит студентов – теплоэнергетиков и электромехаников с фундаментальными законами осуществления тепловых процессов, технологиями получения и преобразования тепловой энергии, оборудованием, машинами и аппаратами, обеспечивающими снабжение тепловой энергией и превращением её в полезную работу.

### Общие положения

Теплотехника – наука, изучающая законы получения, использования, преобразования и переноса тепловой энергии. Теоретической основой теплотехники является *техническая термодинамика*.

*Техническая термодинамика* изучает законы взаимопревращения теплоты и работы, а также тепловые машины, осуществляющие это превращение [1; 2].

При изучении дисциплины студенты, руководствуются программой дисциплины «Техническая термодинамика» для направлений 13.03.01,02, рекомендуемым перечнем разделов и тем (таблица 1), учебниками и учебными пособиями, указанными в библиографическом списке (таблицы 2, 3), слушают обзорные лекции по основным вопросам курса, выполняют практические задания и лабораторные работы, а затем решают задачи по следующим темам:

- 1) расчёт термодинамических процессов при расширении рабочего тела;
- 2) определение параметров водяного пара при подводе теплоты;
- 3) определение расхода пара в паровой турбине (таблица 1).

Таблица 1 – Изучаемые разделы и темы

Шифр РАЗДЕ- ЛА, ТЕМЫ	Наименование раздела, темы дисциплины
	ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА
1	Основные понятия и законы. Параметры состояния. Рабочее тело. Уравнение газового состояния. Термодинамическая система, термодинамический процесс. Газовые смеси. Способы задания газовых смесей. Кажущаяся молекулярная масса, газовая постоянная смеси. Парциальные давления компонентов

Продолжение таблицы 1

2	Первое начало термодинамики. Теплота и работа, внутренняя энергия. Теплоёмкость. Массовая, объёмная, мольная теплоёмкости. Истинная и средняя теплоёмкости. Изохорная и изобарная теплоёмкости. Уравнение Майера
3	Второе начало термодинамики. Круговые процессы, циклы. Графическое изображение термодинамических процессов в $Pv$ - и $Ts$ -координатах. Энтальпия и энтропия. Теплота и работа цикла. Цикл Карно. Термодинамический КПД и холодильный коэффициент. Аналитическое выражение второго закона термодинамики
4	Вода и водяной пар, фазовые переходы, термодинамические таблицы и $hs$ -диаграммы. Цикл Ренкина паротурбинной установки. Термодинамика газовых потоков, дросселирование. Влажный воздух. Основные определения. $Hd$ -диаграмма влажного воздуха. Процессы влажного воздуха.
5	Циклы тепловых машин. Компрессоры. Циклы газотурбинных установок. Циклы ДВС. Циклы Отто, Дизеля, Тринклера. Показатели работы циклов ДВС и их К.П.Д. Графическое изображение циклов в $Pv$ - и $Ts$ -координатах
6	Холодильные машины. Холодильные агенты и их свойства. Схема и цикл парокомпрессионной холодильной установки. Циклы холодильных машин в $Ts$ -координатах. Тепловые насосы. Холодильный и отопительный коэффициенты

Таблица 2 – Библиографический список (основная литература)

№ п/п	Наименование	Используется при изучении разделов, тем
1	Теплотехника учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению «Энергомашиностроение» / А. М. Архаров [и др.] под общ. ред. А. М. Архарова, В. Н. Афанасьева. – Москва : Издательство МГТУ, 2004. – 711с.	1–6
2	Кудинов В. А. Техническая термодинамика / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – Москва : Высшая школа, 2003.	1–6
3	Теплотехника / под ред. А. П. Баскакова. – Москва : Энергоиздат, 1991.	1–12

Таблица 3 – Библиографический список (дополнительная литература)

№ п/п	Наименование	Используется при изучении разделов, тем
1	Техническая термодинамика / под ред. В. И. Крутова. – Москва : Высшая школа, 1981.	1–12
2	Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – Москва : Высшая школа, 1980.	1–6
3	Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. Москва. : Машиностроение, 1973. – 344 с.	1–6
4	Луканин В. Н. Теплотехника / В. Н. Луканин [и др.]. – Москва : Высшая школа, 2004.	1–6

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

При самостоятельной работе над учебником необходимо добиваться отчетливого представления о физической сущности изучаемых явлений и процессов.

При изучении каждого раздела рекомендуется составлять конспект, который будет полезен при повторении и закреплении теоретического материала.

При изучении курса по всем возникающим вопросам студент может получить консультацию на кафедре энергетики.

Методические указания по решению задач приводятся в начале соответствующего раздела. Перед каждой задачей предлагается изучить теоретический материал и разобрать пример расчета.

В каждой задаче исходные данные выбираются из соответствующих таблиц по последней и предпоследней цифре номера зачётной книжки студента. При выполнении задания необходимо соблюдать следующие требования.

- 1 Работу можно выполнять в тетради и набирать в электронном виде. На титульном листе указать № группы Фамилию и инициалы студента, шифр зачетной книжки. Внизу посередине листа указать год и место выполнения работы.
- 2 Обязательно перед решением записать условие задачи и исходные данные для решения каждой задачи согласно шифру.

- 3 Решение сопровождать кратким пояснительным текстом, в котором должно быть указано: какая величина определяется и по какой формуле, какие величины подставляются в формулу (из условия задачи, из учебника, задачника, определена ранее и т.д.).
- 4 Вычисления давать в развернутом виде.
- 5 Обязательно проставлять размерности всех заданных и рассчитанных величин в международной системе СИ.
- 6 Графический материал должен быть выполнен четко, в масштабе и на миллиметровой бумаге, как исключение можно использовать бумагу в клеточку.
- 7 При изучении настоящего курса следует пользоваться литературой, которая приведена в программе дисциплины и библиографическом списке. Решение типовых задач можно найти в учебниках и задачаниках. При использовании таблиц, формул и других справочных материалов, необходимо непосредственно при решении задачи указывать ссылку на литературный источник в квадратных скобках, например – [6].
- 8 После решения задачи должен быть произведен краткий анализ полученных результатов и сделаны соответствующие выводы
- 9 На графиках, в таблицах и формулах принято удельные величины обозначать строчными буквами, а действительные значения - заглавными.
- 10 В конце работы представить библиографический список использованной литературы.

### РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Основными параметрами состояния являются: удельный объём, абсолютная температура, абсолютное давление [2; 3].

Удельный объём  $v$ , м<sup>3</sup>/кг

$$v = \frac{V}{m} = 1/\rho,$$

где  $V$ , м<sup>3</sup> – объём,  $m$ , кг – масса,  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность.

Абсолютная температура  $T$ , °К

$$T = 273,15 + t.$$

Абсолютное давление  $p$ , Па:

$$P = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}},$$

$$P = p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}},$$

где  $p_{\text{атм}}$  – атмосферное давление,

$p_{\text{изб}}$  – избыточное давление,

$p_{\text{вак}}$  – вакуумметрическое давление.

Связь между единицами давления:

$$1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}; \quad 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па},$$

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 100 \text{ кПа}.$$

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 98000 \text{ Па} = 98 \text{ кПа},$$

$$1 \text{ мм. рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}.$$

В технической термодинамике рассматривают следующие основные термодинамические процессы:

- *изохорный* – при постоянном объёме ( $v = \text{const}$ ),
- *изобарный* – при постоянном давлении ( $p = \text{const}$ ),
- *изотермический* – при постоянной температуре ( $T = \text{const}$ ),
- *адиабатный* – без внешнего теплообмена ( $\partial q = 0$ ),
- *политропный* – при постоянной теплоёмкости.

Характеристики относящиеся к 1 кг вещества, называются удельными, Они обозначаются строчными буквами, а характеристики, относящиеся к полной массе – заглавными. Полные характеристики теплоты  $Q$  и работы  $L$  получаются умножением удельных  $q$  и  $l$  на величину массы  $m$ :

$$Q = m \cdot q, \quad L = m \cdot l.$$

Уравнение состояния для 1 кг идеального газа:

$$p \cdot v = R \cdot T$$

При расчётах с произвольной массой  $m$ :

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T$$

где  $R$  Дж/кг·°К – удельная газовая постоянная.

$$p \cdot \mu V = \mu R \cdot T \quad \text{для одного киломоля газа,}$$

где  $\mu R = R_{\mu} = 8,314 \text{ кДж/кмоль} \cdot \text{°К}$  – универсальная газовая постоянная.

Первое начало термодинамики для удельных величин:

$$q = \Delta u + l,$$

где  $q$  – удельная теплота Дж,  $\Delta u$  – изменение внутренней энергии,  $l$  – удельная работа.

Форму для расчета термодинамических процессов представлены в таблице 4 [4; 6].

Таблица 4 – Формулы для расчёта термодинамических процессов

Процесс	Связь параметров	Работа изменения объёма	Теплота
Изохорный	$p_2/p_1 = T_2/T_1$ Закон Шарля	$l = 0$	$q = c_v(T_2 - T_1)$
Изобарный	$v_2/v_1 = T_2/T_1$ Закон Гей – Люссака	$l = p(v_2 - v_1)$	$q = c_p(T_2 - T_1)$
Изотермический	$p_2/p_1 = v_2/v_1$ Закон Бойля – Мариотта	$l = RT \ln v_2/v_1$ $l = RT \ln p_2/p_1$	$l = q$
Адиабатный	$p_2/p_1 = (v_1/v_2)^k$ $T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{k-1}$ $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{k-1/k}$	$l = \frac{R}{k-1}(T_1 - T_2)$	$q = 0$
Политропный	$p_2/p_1 = (v_1/v_2)^n$ $T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{n-1}$ $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{n-1/n}$	$l = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2)$	$l = c_v \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2)$

Изменение внутренней энергии идеального газа в термодинамическом процессе:

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

Изменение энтальпии идеального газа в термодинамическом процессе:

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

Массовые теплоёмкости идеального газа  $C_p$  и  $C_v$  можно определить по формулам:

$$C_p = k \cdot R / (k - 1)$$

$$C_v = R / (k - 1),$$



или

$$C_p = \mu C_{p/\mu}$$
$$C_v = \mu C_{v/\mu},$$

$k = C_p/C_v$  – показатель адиабаты или коэффициент Пуассона.

### Пример расчёта

Смесь, состоящая из  $r_1$  кило-молей азота и  $r_2$  кило-молей кислорода с начальными параметрами  $p_1 = 1$  МПа и  $T_1 = 1000$  °К расширяется до давления  $p_2$ . Расширение может осуществляться по изотерме, адиабате и политропе с показателем  $n$ . Определить газовую постоянную смеси, среднюю (кажущуюся) молярную массу и начальный удельный объем, конечные параметры смеси, работу расширения и теплоту, участвующую в процессе.

Дать сводную таблицу результатов и анализ ее. Показать процессы в  $Pv$ - и  $Ts$ -диаграммах.

Таблица 5 – Выбор варианта для расчёта задачи №1

Последняя цифра шифра зачетной книжки	$r_1$	$r_2$	Предпоследняя цифра шифра зачетной книжки	$p_2$ , МПа	$n$
	к-моль				
3	0,4	0,6	2	0,35	1,5

Средняя (кажущаяся) молярная масса смеси

$$\mu_{см} = \sum_1^n \mu_i \cdot r_i,$$

где  $\mu_i$  молярная масса  $i$  компонента смеси,  $r_i$  – объёмная концентрация  $i$  компонента смеси.

молярная масса азота  $N_2 \mu_1 = 28 \text{ кг} / \text{кмоль}$ .

молярная масса кислорода  $O_2 \mu_2 = 32 \text{ кг} / \text{кмоль}$ .

Средняя молярная масса смеси  $\mu_{см} = \mu_1 \cdot r_1 + \mu_2 \cdot r_2$ .

$$\mu_{см} = 28 \cdot 0,4 + 32 \cdot 0,6 = 30,4 \text{ [кг/кмоль]}$$

$$\text{Газовая постоянная смеси } R = 8314 / \mu_{см} = \frac{8314}{30,4} = 273,5 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$$

Из уравнения состояния идеального газа:

$$v p = R T$$

находим начальный объем смеси:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{0,273 \cdot 1000}{1 \cdot 10^6} = 0,273 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

*Изотермический процесс*

Конечный объем:

$$v_2 = \frac{v_1 \cdot p_1}{p_2} = \frac{0,273 \cdot 1 \cdot 10^6}{0,33 \cdot 10^6} = 0,827 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Конечная температура смеси

$$T_2 = T_1 = 1000 \text{ K}$$

Работа расширения равна теплоте поведенной к смеси

$$q = l = p_1 \cdot v_1 \ln(v_2/v_1) = 1 \cdot 10^6 \cdot 0,273 \cdot \ln\left(\frac{0,827}{0,273}\right) = 30,257 \text{ кДж/кг}.$$

*Адиабатный процесс*

Показатель адиабаты для двухатомных газов примем равным  $k = 1,4$

Конечный объем смеси

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}} = 0,273 \cdot \left(\frac{1}{0,33}\right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,602 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Конечная температура смеси

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 1000 \cdot \left(\frac{0,33}{1}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 725 \text{ K}$$

Работа расширения

$$l = \frac{(p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2)}{k - 1} = \frac{1 \cdot 10^6 \cdot 0,273 - 0,33 \cdot 10^6 \cdot 0,602}{1,4 - 1} = 74,340 \text{ кДж/кг}$$

Теплота, подведенная к газу в адиабатном процессе равна нулю  $q = 0$ .

*Политропный процесс*

Конечный объем смеси

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}} = 0,273 \cdot \left(\frac{1}{0,33}\right)^{\frac{1}{1,6}} = 0,546 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Конечная температура смеси

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = 1000 \cdot \left(\frac{0,33}{1}\right)^{\frac{1,6-1}{1,6}} = 660 \text{ K}$$

Работа расширения

$$l = \frac{(p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2)}{n-1} = \frac{(1 \cdot 10^6 \cdot 0,273 - 0,33 \cdot 10^6 \cdot 0,546)}{1,6-1} = 92,82 \text{ кДж/кг}.$$

Теплота, подведенная к газу

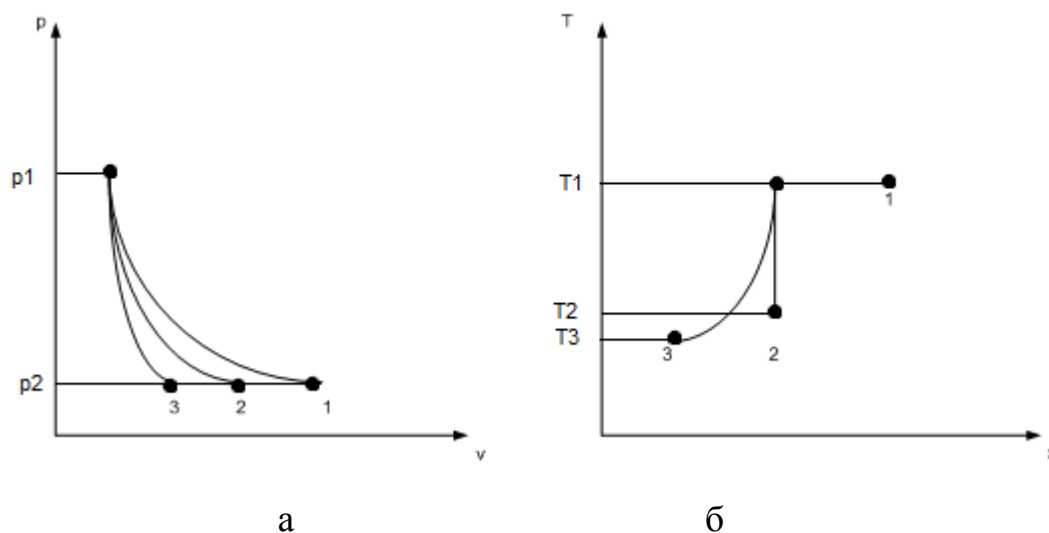
$$q = c_v \frac{R}{n-1} \cdot (T_2 - T_1) = \frac{1,6-1,4}{1,6-1} \cdot (660 - 1000) = -106,009 \text{ кДж/кг}$$

Результаты расчётов сводим в таблицу 6.

Таблица 6 – Результаты расчета термодинамических процессов

Процесс	$V_2, \text{м}^3/\text{кг}$	$T_2, \text{°K}$	Теплота $q_{1,2}, \text{КДж/кг}$	Работа $l_{1,2}, \text{КДж/кг}$
Изотермический	0,827	1000	30,257	30,257
Адиабатный	0,602	725	0	74,34
Политропный	0,546	660	-106,01	92,82

На основании расчётов строим графики процессов в  $Pv$ - и  $Ts$ - координатах



а) графики процессов в  $Pv$ -координатах; б) графики процессов в  $Ts$ -координатах

1 – изотермический; 2 – адиабатный; 3 – политропный

Рисунок 1 – Графики термодинамических процессов

### Задача № 1 для самостоятельной работы

Смесь, состоящая из  $M_1$  кило-молей азота и  $M_2$  кило-молей кислорода с начальными параметрами  $p_1 = 1$  Мпа и  $T_1 = 1000$  К расширяется до давления  $p_2$ . Расширение может осуществляться по изотерме, адиабате и политропе с показателем  $n$ . Определить газовую постоянную смеси, ее массу и начальный объем, конечные параметры смеси, работу расширения и теплоту, участвующую в процессе.

Дать сводную таблицу результатов и анализ ее. Показать процессы на  $Pv$ - и  $Ts$ -диаграммах.

Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 7.

Указание. Показатель адиабаты, следовательно, и теплоемкости  $C_p$  и  $C_v$  следует принять постоянными, не зависящими от температуры [7].

Таблица 7 – Выбор варианта самостоятельной работы

Последняя цифра шифра	$M_1$	$M_2$	Предпоследняя цифра шифра	$p_2$ , МПа	n
	к-моль				
0	0,1	0,9	0	0,43	1,2
1	0,2	0,8	1	0,40	1,3
2	0,3	0,7	2	0,35	1,5
3	0,4	0,6	3	0,33	1,6
4	0,5	0,5	4	0,31	1,7
5	0,6	0,4	5	0,47	1,1
6	0,7	0,3	6	0,54	0,5
7	0,8	0,2	7	0,57	0,8
8	0,9	0,1	8	0,62	0,7
9	0,5	0,5	9	0,66	0,6

Расчет произвести, как показано в примере, с построением графиков термодинамических процессов.

### **Расчет параметров термодинамических процессов водяного пара**

Расчет процессов водяного пара заключается в определении всех параметров начального и конечного состояния, теплоты и работы процесса.

Параметры начального и конечного состояний определяются с помощью диаграмм или по таблицам [3]. Способ расчета с помощью таблиц более точен и не имеет ограничений. Способ с использованием  $hs$ -диаграммы более прост, нагляден, но возможен только для влажного насыщенного пара с  $x > 0,6$ , сухого насыщенного пара и перегретого пара [4].

#### ***Расчет по таблицам водяного пара***

Таблицы для определения термодинамических свойств веществ различаются в зависимости от того, какое состояние рассматривается: однофазное или двухфазное. В таблицах для состояния насыщения удельные значения объема, энтальпии и энтропии насыщенной жидкости отмечаются одним штрихом, су-

хого насыщенного пара отмечаются двумя штрихами. Для определения свойств каждой из фаз в состоянии насыщения надо знать только один параметр – давление или температуру, т. к. при насыщении они однозначно связаны между собой [3].

В этих же таблицах приводится удельная теплота парообразования  $r = h'' - h'$  – разность энтальпий сухого насыщенного пара и насыщенной жидкости. Для расчета параметров влажного насыщенного пара необходимо знать также степень сухости пара  $x$ .

Параметры влажного пара рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned}v &= v'' \cdot x + v' \cdot (1-x), \\h &= h'' \cdot x + h' \cdot (1-x) = h' + r \cdot x, \\s &= s'' \cdot x + s' \cdot (1-x) = s' + (r \cdot x) / T_s\end{aligned}$$

Степень сухости пара определяется по одной из следующих формул:

$$\begin{aligned}x &= (s - s') / (s'' - s'), \\x &= (h - h') / (h'' - h'), \\x &= (v - v') / (v'' - v').\end{aligned}$$

Для определения свойств в однофазном состоянии надо знать два параметра этого состояния – давление и температуру. В ячейке таблицы, соответствующей данному состоянию, помещены удельные значения объема « $v$ », энтальпии « $h$ » и энтропии « $s$ ».

Внутренняя энергия для воды и водяного пара рассчитывается по формуле:

$$u = h - p \cdot v.$$

### ***Расчет по $h$ - $s$ -диаграмме***

На энтальпийно-энтропийной,  $hs$  диаграмме обычно наносятся: линии изобар ( $p = \text{const}$ ); линии изотерм ( $t = \text{const}$ ); в области влажного пара изотермы не наносят, так как они совпадают с изобарами; изохоры ( $v = \text{const}$ ), изображаются пунктирной линией или линией другого цвета; линии постоянной степени сухости влажного пара ( $x = \text{const}$ ) наносятся в области влажного насыщенного пара.

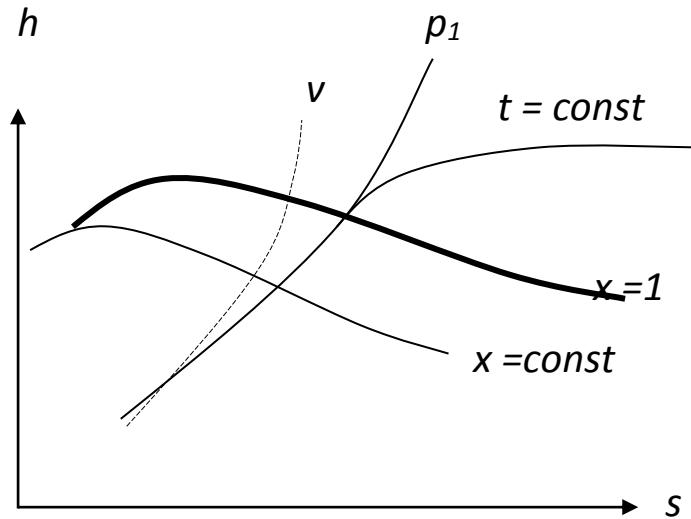


Рисунок 2 – энтальпийно-энтропийная ( $h-s$ ) диаграмма водяного пара

Изменение внутренней энергии для процесса определяется по уравнению:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (h_2 - p_2 \cdot v_2) - (h_1 - p_1 \cdot v_1)$$

Расчетные формулы для теплоты  $q$  и работы  $\ell$  приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Формулы для расчета теплоты и работы

Процесс	Работа изменения объема	Теплота
Изохорный	$\ell = 0$	$q = u_2 - u_1 = (h_2 - h_1) - v \cdot (p_2 - p_1)$
Изобарный	$\ell = q - \Delta u$ $\ell = p(v_2 - v_1)$	$q = h_2 - h_1$
Изотермический	$\ell = q - \Delta u$	$q = T \cdot (s_2 - s_1)$
Адиабатный	$\ell = (u_2 - u_1)$	$q = 0$

Примеры определения параметров термодинамических процессов с использованием энтальпийно-энтропийной  $h-s$  ( $i-s$ ) диаграммы водяного пара

### Изотермический процесс в $i$ - $s$ координатах

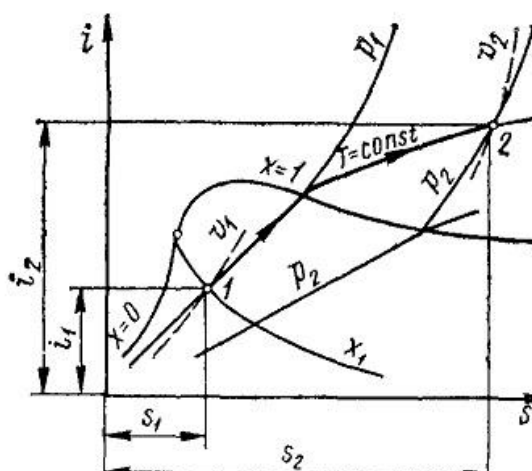


Рисунок 3 – Определение параметров изотермического процесса

На  $h-s$ -диаграмме на пересечении изобары  $p_1$  и линии постоянной степени сухости  $x_1$  находим точку 1, которая находится в области влажного насыщенного пара:  $p_1, t_1, h_1, s_1, v_1$  [4].

Количество теплоты, подведенной в изотермическом процессе:

$$q = T(s_2 - s_1), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (1)$$

откуда находим значение энтропии в точке 2, характеризующей состояние пара в конце процесса расширения

$$s_2 = \frac{q}{T} + s_1, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \quad (2)$$

На  $h-s$ -диаграмме на пересечении изотермы  $t_1$  и линии постоянной энтропии  $s_2$  находим точку 2, которая находится в области сухого перегретого пара:  $p_2, t_2 = t_1, h_2, s_2, v_2$ .

Изменение энтальпии:

$$\Delta h = h_2 - h_1, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (3)$$

Изменение энтропии:

$$\Delta s = s_2 - s_1, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (4)$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (5)$$

Работа расширения:

$$l = q - \Delta u, \text{ кДж/кг} \quad (6)$$

Изобарный процесс в  $i-s$  координатах

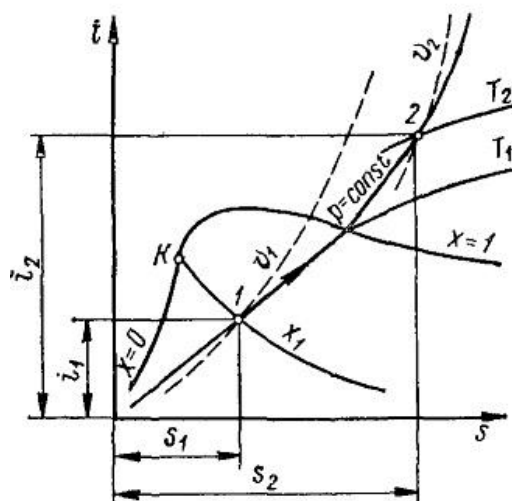


Рисунок 4 – Определение параметров изобарного процесса

Количество теплоты, подведенной в изобарном процессе:

$$q = h_2 - h_1, \text{ кДж/кг} \quad (7)$$

откуда находим значение энтальпии в точке 2, характеризующей состояние пара в конце процесса расширения

$$h_2 = q + h_1, \text{ кДж/кг} \quad (8)$$

На  $h-s$ -диаграмме (рисунок 4) на пересечении изобары  $p_1$  и изоэнтальпы  $h_2$  находим точку 2, которая находится в области сухого перегретого пара:

$t_2, s_2, v_2$ .

Изменение энтальпии:

$$\Delta h = q$$

Изменение энтропии:

$$\Delta s = s_2 - s_1, \text{ кДж/кг} \quad (9)$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = h_2 - h_1 - p(v_2 - v_1), \text{ кДж/кг} \quad (10)$$



Работа расширения:

$$l = p(v_2 - v_1), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (11)$$

При заданных  $p_1$  и  $q$  работа будет больше в изотермическом процессе ( $t = \text{const}$ ) за счет того, что в этом процессе изменение внутренней энергии меньше, чем в изобарном процессе расширения ( $p = \text{const}$ ). Если конечная точка процесса расширения попадает в область влажного пара упрощаются расчеты обоих циклов ( $t = \text{const}, p = \text{const}$ ), так как в области влажного пара на  $h-s$ -диаграмме изобары совпадают с изотермами.

### Пример расчёта

1 кг водяного пара с начальным давлением  $p_1 = 5$  МПа и степенью сухости  $x_1 = 0,93$  изотермически расширяется; при этом к нему подводится теплота  $q = 480$  кДж/кг. Определить, пользуясь  $h-s$ -диаграммой, параметры конечного состояния пара, работу расширения, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии. Решить также задачу, если расширение происходит изобарно. Изобразить процессы в  $p-v$ -,  $Ts$ - и  $h-s$ -диаграммах.

Решение

### Изотермический процесс расширения

На  $h-s$ -диаграмме (рисунок 5) на пересечении изобары  $p_1 = 5,0$  МПа и линии постоянной степени сухости  $x_1 = 0,93$  находим точку 1, которая находится в области влажного насыщенного пара:  $p_1 = 5,0$  МПа,  $t_1 = 264^\circ\text{C}$ ,  $h_1 = 2680$  кДж/кг,  $s_1 = 5,760$  кДж/(кг·К),  $v_1 = 0,037$  м<sup>3</sup>/кг.

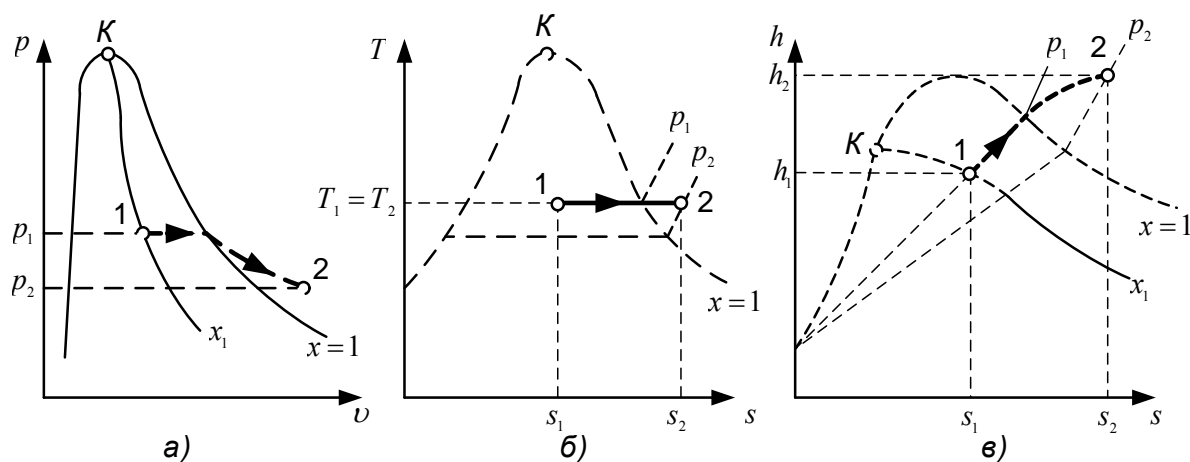


Рисунок 5 – Изотермический процесс расширения на  $p-v$ ,  $T-s$  и  $h-s$ -диаграммах

Количество теплоты, подведенной в изотермическом процессе (1):

$$q = T(s_2 - s_1), \text{ кДж/кг}$$

откуда находим значение энтропии в точке 2, характеризующей состояние пара в конце процесса расширения (2):

$$s_2 = \frac{q}{T} + s_1, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$$
$$s_2 = \frac{480}{234 + 264} + 5,760 = 6,691 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$$

На  $h - s$ -диаграмме на пересечении изотермы  $t_2 = 264^\circ\text{C}$  и линии постоянной энтропии  $s_2 = 6,691 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$  находим точку 2, которая находится в области сухого перегретого пара:  $p_2 = 1,742 \text{ МПа}$ ,  $t_2 = 264^\circ\text{C}$ ,  $h_2 = 2948 \text{ кДж/кг}$ ,  $s_2 = 6,691 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ ,  $v_2 = 0,134 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Изменение энтальпии (3):

$$\Delta h = h_2 - h_1, \text{ кДж/кг}$$
$$\Delta h = 2948 - 2680 = 268 \text{ кДж/кг}$$

Изменение энтропии (4):

$$\Delta s = s_2 - s_1, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$$
$$\Delta s = 6,691 - 5,760 = 0,931 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$$

Изменение внутренней энергии (5):

$$\Delta u = h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1), \text{ кДж/кг}$$
$$\Delta u = 2948 - 2680 - (1,742 \cdot 10^3 \cdot 0,134 - 5,0 \cdot 10^3 \cdot 0,037) = 220 \text{ кДж/кг}$$

Работа расширения (6):

$$l = q - \Delta u, \text{ кДж/кг}$$
$$l = 480 - 220 = 260 \text{ кДж/кг}$$

### Изобарный процесс расширения

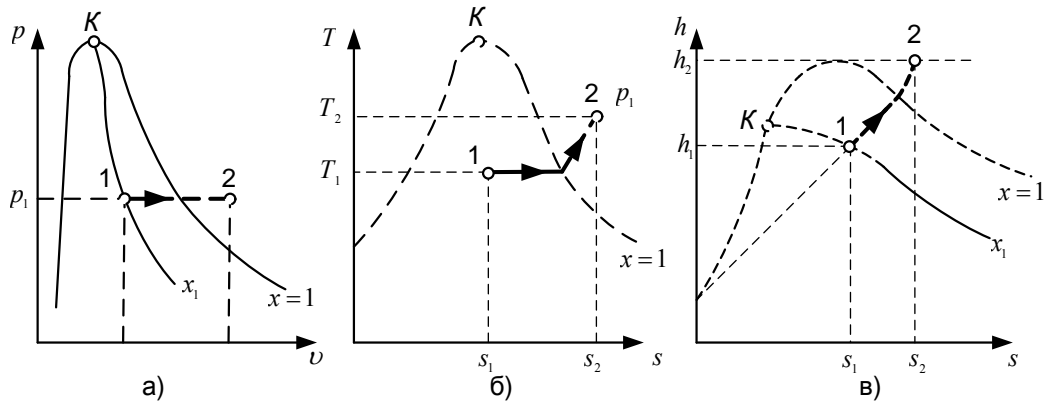


Рисунок 6 – Изобарный процесс расширения на  $p - v$ ,  $T - s$  и  $h - s$ -диаграммах

Количество теплоты, подведенной в изобарном процессе:

$$q = h_2 - h_1, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

откуда находим значение энтальпии в точке 2, характеризующей состояние пара в конце процесса расширения (8):

$$h_2 = q + h_1, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$h_2 = 480 + 2680 = 3160 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

На  $h - s$ -диаграмме (рисунок 6) на пересечении изобары  $p_1 = 5,0 \text{ МПа}$  и изоэнтальпы  $h_2 = 3160 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  находим точку 2, которая находится в области сухого перегретого пара:  $t_2 = 393^\circ \text{C}$ ,  $s_2 = 6,623 \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$ ,  $v_2 = 0,057 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ .

Изменение энтальпии:

$$\Delta h = q = 480 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Изменение энтропии (9):

$$\Delta s = s_2 - s_1, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\Delta s = 6,623 - 5,760 = 0,863 \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$$

Изменение внутренней энергии (10):

$$\Delta u = h_2 - h_1 - p(v_2 - v_1), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\Delta u = 3160 - 2680 - 5,0 \cdot 10^3 (0,057 - 0,037) = 400 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Работа расширения (11):

$$l = p(v_2 - v_1), \text{кДж/кг}$$

$$l = 5,0 \cdot 10^3 (0,057 - 0,037) = 100 \text{кДж/кг}$$

При заданных  $x_1$ ,  $p_1$  и  $q$  работа  $l$  будет больше в изотермическом процессе ( $t = const$ ) за счет того, что в этом процессе изменение внутренней энергии меньше, чем в изобарном процессе расширения ( $p = const$ ). Если конечная точка процесса расширения попадает в область влажного пара упрощаются расчеты обоих циклов ( $t = const$  и  $p = const$ ), так как в области влажного пара на  $h-s$ -диаграмме изобары совпадают с изотермами.

### Задача № 2 для самостоятельной работы

1 кг водяного пара с начальным давлением  $p_1$  и степенью сухости  $x_1$  изотермически расширяется; при этом к нему подводится теплота  $q$ . Определить, пользуясь  $h-s$ -диаграммой, параметры конечного состояния пара, работу расширения, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии. Решить также задачу, если расширение происходит изобарно. Изобразить процессы в  $Pv$ -,  $Ts$ - и  $h-s$ -диаграммах. Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 9.

Таблица 9 – Выбор варианта для самостоятельной работы

Последняя цифра шифра	$p_1$ , Мпа	$x_1$	Предпоследняя цифра шифра	$q$ ,кДж/кг
0	3	0.97	0	500
1	3.5	0.96	1	480
2	4	0.95	2	460
3	4.5	0.93	3	420
4	5	0.93	4	420
5	5.5	0.92	5	410
6	6	0.91	6	430
7	6.5	0.95	7	470
8	7	0.92	8	480
9	8	0.91	9	500

Задача решается с использованием энтальпийно-энтропийной  $h-s$  ( $i-s$ ) - диаграммы водяного пара (рисунок 7).

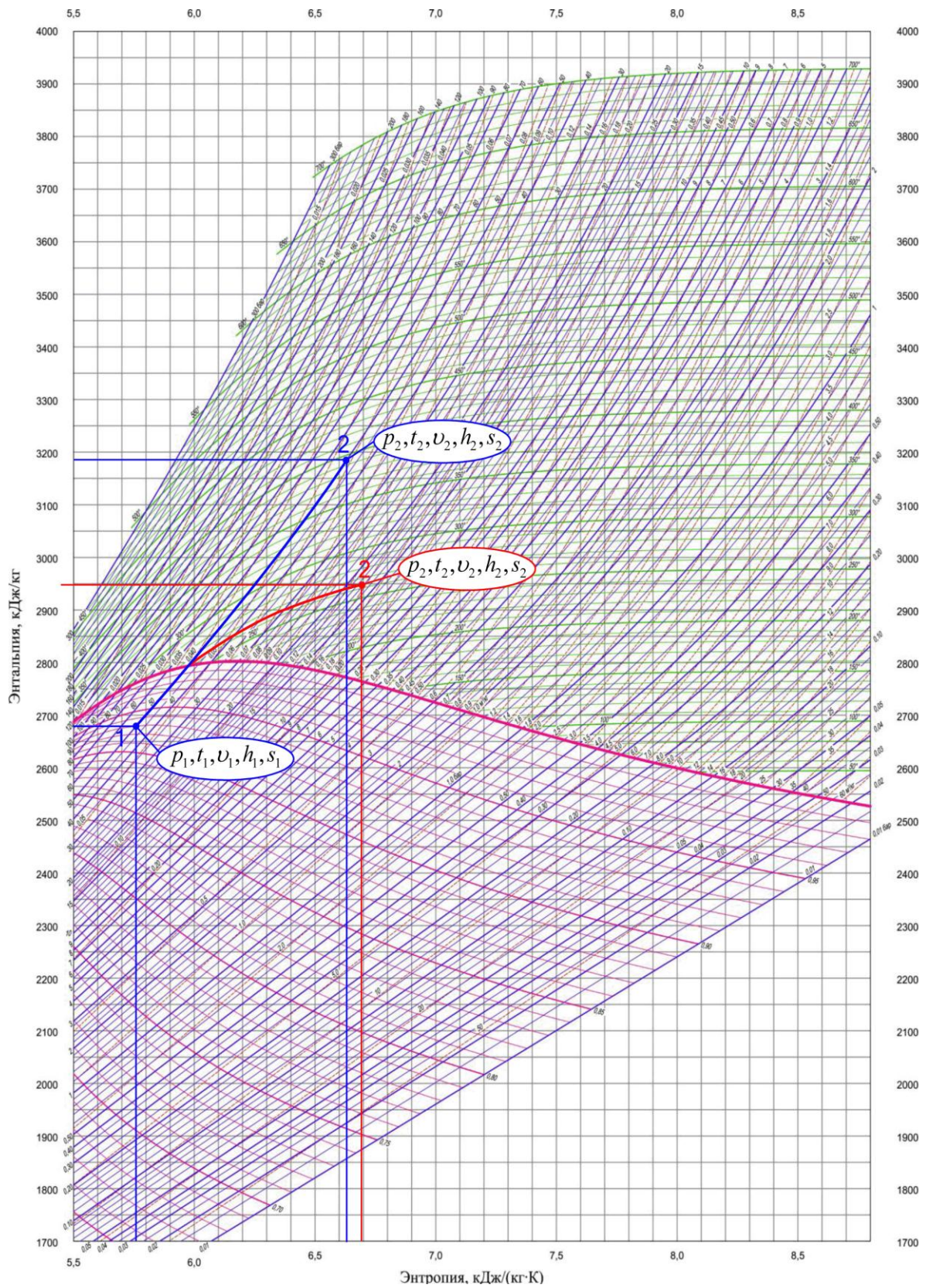


Рисунок 7– h–s-диаграмма водяного пара

## РАСЧЕТ РАСХОДА ПАРА В ТУРБИНЕ

Удельный расход пара определяется по формуле:

$$d = \frac{3600}{(h_1 - h_2) \times \eta_{oi}},$$

где  $h_1$  – энтальпия пара перед турбиной;

$h_2$  – энтальпия пара в конденсаторе.

Часовой расход пара:

$$D = d \cdot N,$$

$$N = \frac{N_3}{\eta_3 \times \eta_m} \text{ MBm.}$$

Энтальпия пара перед турбиной определяется по параметрам перегретого пара: давлению  $p_1$  и температуре  $t_1$  (по  $h$ - $s$ -диаграмме приложение 1) [4]. Теоретически расширение пара в турбине происходит адиабатически по линии 1–2 до давления  $p_2$ . Степень сухости пара в конце теоретического процесса расширения  $x_2$ .

Действительный цикл сопровождается неизбежными потерями, вследствие чего удельный расход пара и тепла увеличивается на трение. Работа трения превращается в тепло, повышающее энтальпию пара в конечном состоянии. Конечное состояние в этом случае изображается точкой 2d. Энтальпия в этой точке равна:

$$h_{2d} = h_1 - (h_1 - h_2) \cdot \eta_{oi} \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Определение степени сухости пара действительного процесса определим по схеме на рисунке 8 ( $h$ - $s$ -диаграмма  $x_{2d}$ )

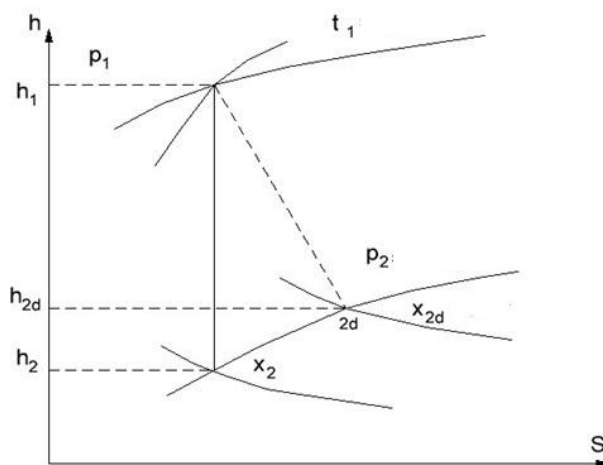


Рисунок 8 –  $h$ - $s$ -диаграмма водяного пара

Абсолютный электрический КПД турбогенератора

$$\eta_a = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_g,$$

где  $\eta_t$  – термический КПД.

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h'_2}$$

где  $h'_2$  кДж/кг – энтальпия кипящего конденсата.

*Пример расчёта*

Определить часовой расход пара  $D$  (килограммов в час) и удельный расход пара  $d$  (килограммов на киловатт-час) на конденсационную турбину, работающую без регенерации теплоты, по заданной электрической мощности турбогенератора  $N_{эл.} = 180$  МВт, давлению  $p_1 = 8,6$  Мпа и температуре  $t_1 = 480$  °С перегретого пара перед турбиной и относительному внутреннему КПД турбины  $\eta_{oi} = 0,83$ . Давление пара в конденсаторе принять  $p_2 = 4$  кПа. Механический КПД турбины  $\eta_m$  и КПД электрогенератора  $\eta_g$  принять  $\eta_m = \eta_g = 0,99$ . Определить также степень сухости пара в конце теоретического и действительного процессов расширения (изобразив процессы в  $h-s$ -координатах) и абсолютный электрический КПД турбогенератора. Мощностью привода питательного насоса пренебречь.

*Решение*

Удельный расход пара:

$$d = \frac{3600}{(h_1 - h_2) \times \eta_{oi}},$$

где  $h_1 = 3420$  кДж/кг – энтальпия пара перед турбиной;

$h_2 = 2020$  кДж/кг – энтальпия пара в конденсаторе.

$$d = \frac{3600}{(3420 - 2020) \times 0,83} = 3,09 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч.}$$

Часовой расход пара:

$$D = d \cdot N,$$
$$N = \frac{N_g}{\eta_g \times \eta_m} = \frac{180}{0,99^2} = 183,6 \text{ МВт.}$$

Степень сухости пара в конце теоретического и действительного процессов расширения:

$$x_2 = 0,775$$

Адиабатное расширение пара в турбине по линии 1–2 является теоретическим, степень сухости в этом случае равна (по  $h$ – $s$ -диаграмме). Действительный цикл сопровождается неизбежными потерями, вследствие чего удельный расход пара и тепла увеличивается на трение. Работа трения превращается в тепло, повышающее энтальпию пара в конечном состоянии.

Конечное состояние в этом случае изображается точкой 2d. Энтальпия в этой точке равна:

$$h_{2d} = h_1 - (h_1 - h_2) \cdot \eta_{oi} = 3420 - (3420 - 2020) \cdot 0,83 = 2258 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Степень сухости пара действительного процесса также определим по  $h$ – $s$ -диаграмме.

$$X_{2d} = 0,89.$$

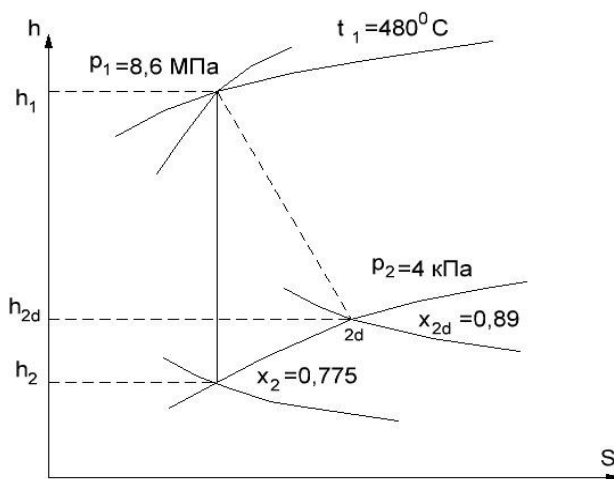


Рисунок 9 –  $h$ – $s$ -диаграмма водяного пара

Абсолютный электрический КПД турбогенератора

$$\eta_a = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_g,$$

где  $\eta_t$  – термический КПД.

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h'_2} = \frac{3420 - 2020}{3420 - 121} = 0,424,$$

где  $h'_2 = 121 \text{ кДж/кг}$  – энтальпия кипящего конденсата.

### Схема работы паросиловой установки

Схема паросиловой установки ПСУ показана на рисунке 10. ПСУ имеет в своем составе котел (1) с пароперегревателем (2), турбину (3) с электрогенератором (4, обычно синхронный трехфазный), конденсатор (5) и насос для конденсата (6) [3; 4].



Насос подает в котел воду под высоким давлением. За счет энергии сгорания топлива в топке вода в котле испаряется, нагревается дополнительно в пароперегревателе до необходимой температуры и этот пар под высоким давлением подается в турбину. Давление пара определяется насосом.

В турбине пар расширяется и приводит её во вращение за счет своей внутренней энергии. Внутренняя энергия пара сначала переходит в его кинетическую энергию, когда пар адиабатически расширяется в соплах, затем этот поток пара подается на лопатки турбины и передает ей часть своей кинетической энергии.

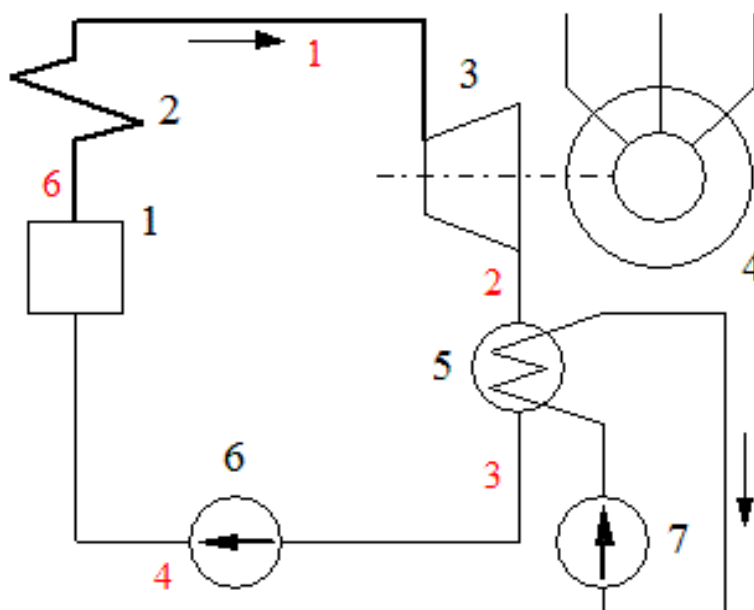


Рисунок 10 – Схема паросиловой установки

Турбины обычно многоступенчатые для увеличения коэффициента полезного действия; после каждой ступени скорость пара и его давление уменьшаются, а поперечный размер парового потока увеличивается, поэтому каждая следующая ступень имеет диаметр больше, чем предыдущий.

Турбина приводит во вращение генератор, который вырабатывает электроэнергию. Отработанный пар имеет давление значительно меньше атмосферного (примерно 3–4 кПа и соответственно температуру конденсации 24–29 °С. И степень сухости всегда меньше 1 (чем меньше степень сухости отработанного пара, тем выше КПД турбины). Этот влажный пар подается в конденсатор, где он окончательно конденсируется в конденсат (дистиллированная вода), подается в насос, который снова повышает её давление и подается опять в котел. Так как удельный объем воды во много раз

меньше, чем у перегретого пара, то и мощность, потребляемая насосом, во много раз меньше мощности турбины и иногда даже не учитывается при вычислении КПД цикла Ренкина. (7) – насос для охлаждающей воды (с температурой от 0 до 20 °С), которая берется из окружающей среды (река, море, пруд) и туда же возвращается.

КПД цикла Ренкина тем выше, чем больше начальная энтальпия перегретого пара (то есть давление и температура) и чем меньше конечная энтальпия влажного пара. При заданной температуре (а значит, и давлении) в конденсаторе конечная энтальпия влажного пара зависит только от степени сухости, то есть энтропии пара в начале и в конце расширения (при идеальном адиабатическом расширении эти энтропии равны). Чем меньше энтропия, тем меньше степень сухости влажного пара, тем выше КПД. Для уменьшения начальной энтропии перегретого пара нужно увеличивать его давление.

Минимально допустимое значение степени сухости пара на выходе турбины  $x_2$  примерно равно 0,8 [4].

### **Задача № 3 для самостоятельного решения**

Используя рисунок 11 определить часовой расход пара  $D$  (кг/ч) и удельный расход пара  $d$  (кг/кВт·ч) на конденсационную турбину, работающую без регенерации теплоты, по заданной электрической мощности турбогенератора  $N_{эл}$ , давлению  $p_1$  и температуре  $t_1$  перегретого пара перед турбиной и относительному внутреннему КПД турбины  $\eta_{oi}$ . Давление пара в конденсаторе принять  $p_2 = 4$  кПа. Механический КПД турбины  $\eta_m$  и КПД электрогенератора  $\eta_g$  принять  $\eta_m = \eta_g = 0,99$ . Определить также степень сухости пара в конце теоретического и действительного процессов расширения (изобразив процессы в  $h-s$  координатах) и абсолютный электрический КПД турбогенератора. Мощностью привода питательного насоса пренебречь. Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 10.

Таблица 10 – Выбор варианта для самостоятельного решения

Последняя цифра шифра	$N_{эл.}$ МВт	$\eta_{oi}$	Предпоследняя цифра шифра	$p_1,$ МПа	$t_1,$ °С
0	100	0.76	0	8.5	500
1	120	0.77	1	9.5	510
2	140	0.79	2	9.2	515
3	160	0.81	3	12	540
4	180	0.83	4	12	520
5	200	0.85	5	13	540
6	170	0.84	6	13	520
7	130	0.82	7	14	540
8	150	0.8	8	8,6	480
9	190	0.86	9	9,0	500

Изобразить схему паросиловой установки и дать её краткое описание. Объяснить, как влияют начальные и конечные параметры пара на КПД цикла Ренкина, а также на степень сухости пара в конце расширения ( $x_2$ ). Указать, каковы минимально допустимые значения  $x_2$  и почему?

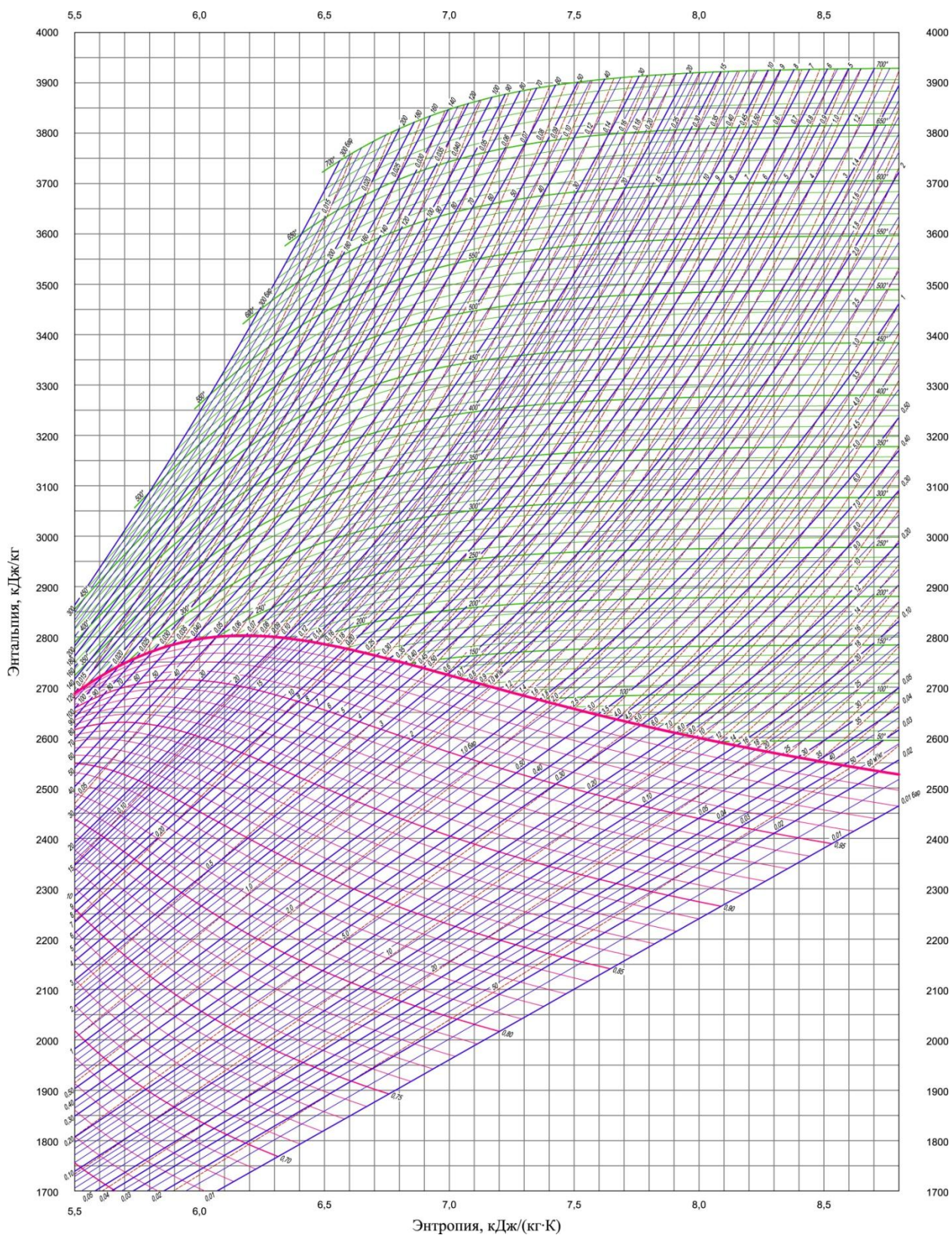


Рисунок 11 –  $h$ - $s$ -диаграмма водяного пара

### Библиографический список

- 1 Луканин В. Н. Теплотехника / В. Н. Луканин. – Москва : Высшая школа, 2004.
- 2 Кудинов В. А. Техническая термодинамика / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – Москва : Высшая школа, 2003.
- 3 Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – Москва : Высшая школа, 1980.
- 4 Теплотехника / учебник для вузов под ред. А. П. Баскакова. – Москва : Энергоиздат, 1991.
- 5 Техническая термодинамика / под ред. В. И. Крутова. – Москва : Высшая школа, 1981.
- 6 Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике / О. М. Рабинович. – Москва: Машиностроение, 1973. – 344с.
- 7 Балахонцев Е. В. Теплотехника : методические указания и контрольные задания для студентов-заочников инженерно-технических специальностей высших учебных заведений / Е. В. Балахонцев А. А. Верес. – Москва : Высшая школа, 1986 – 86 с.

Савельев Виктор Андреевич

## **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

Методические указания  
для бакалавров направлений 13.03.01, 13.03.02

Редактор Л. П. Чукомина

---

Подписано в печать 25.01.22 Формат 60x84 1/16

Бумага 80 г/м<sup>2</sup>

Печать цифровая

Усл. печ. л. 1,85

Уч.-изд. л. 1,85

Заказ 05

Тираж 25

---

Библиотечно- издательский центр КГУ

640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.

Курганский государственный университет.