

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

«Курганский государственный университет»

Кафедра «Энергетика и технология металлов»

Решения задач размещены на сайте zadachi24.ru

Методические указания

к выполнению самостоятельной работы

по дисциплине «Техническая термодинамика»

для бакалавров направлений 13.03.01, 13.03.02

Курган 2020

Кафедра : « Энергетика и технология металлов»

Дисциплина: «Техническая термодинамика»

направления 13.03.01,13.03.02.

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

Утверждены на заседании кафедры « 4 » сентября 2020г.

Рекомендованы методическим советом университета « 16 »декабря 2020 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. Студенту предлагается самостоятельно проработать материал, указанный в предлагаемом перечне разделов и тем изучаемой дисциплины, а затем решить задачи по следующим темам курса: расчёт термодинамических процессов, определить параметры водяного пара при подводе теплоты, расход пара в паровой турбине.

Изучаемые разделы и темы

ШИФР РАЗДЕЛА 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.
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 к.п.д. и холодильный коэффициент. Аналитическое выражение второго закона термодинамики.
4	Вода и водяной пар, фазовые переходы, термодинамические таблицы и $h-s$ диаграммы. Цикл Ренкина паротурбинной установки. Термодинамика газовых потоков, дросселирование. Влажный воздух. Основные определения. $h-d$ 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.

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. - М.: Издательство МГТУ, 2004. – 711с,	1 - 6.
2	Кудинов В.А., Карташов Э.М. Техническая термодинамика. – М.: Высшая школа, 2003.	1 - 6.
3	Теплотехника /под ред. А.П. Баскакова. – М.: Энергоиздат, 1991.	1 - 12.

Дополнительная литература

№ п/п	Наименование	Используется при изучении разделов, тем
1	Техническая термодинамика / под ред. В.И. Крутова– М.: Высшая школа, 1981.	1 - 12.
2	Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача [Текст] / В.В. Нащокин. – М.: Высшая школа, 1980.	1 - 6

3	Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. М.: Машиностроение, 1973. –344 с.	1 - 6.
4	Луканин, В.Н. Теплотехника [Текст] / В.Н. Луканин [и др.].– М.: Высшая школа, 2004.	1 - 6.

Методические указания и задание к выполнению самостоятельной работы

Студенту выдается индивидуальное задание, согласно которому он должен решить три задачи. 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 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. 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.
В конце работы дать перечень использованной литературы.

Расчёт параметров процессов идеального газа

Основными параметрами состояния являются: удельный объём, абсолютная температура, абсолютное давление.

Удельный объём v , м³/кг ;

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

где V , м³ – объём, m , кг – масса, ρ , кг/м³ – плотность.

Абсолютная температура T , °K

$$T = 273,15 + t$$

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 ($\delta q = 0$),

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 получаются умножением удельных на величину массы:

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

Уравнение состояния идеального газа:

$$p \cdot v = R \cdot T \quad \text{для 1 кг идеального газа;}$$

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad \text{при расчётах с произвольной массой } m,$$

где R , Дж/кг $^{\circ}$ К – удельная газовая постоянная.

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

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

Первое начало термодинамики для удельных величин:

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

где q – удельная теплота Дж., Δu – изменение внутренней энергии,
 l – удельная работа.

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:

$$c_p = k \cdot R / (k - 1), \quad c_v = R / (k - 1),$$

или

$$c_p = \mu c_{p/\mu}, \quad c_v = \mu c_{v/\mu},$$

$k = c_p / c_v$ – показатель адиабаты или коэффициент Пуассона.

Пример расчёта

Смесь, состоящая из γ_1 кило-молей азота и γ_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 политропес 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.

По таблице 1 выбираем для расчёта необходимые данные r_1, r_2, p_2, n .

Последняя цифра шифра зачетной книжки	г ₁	г ₂	Предпоследняя цифра шифра зачетной книжки	р 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 μ_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 $\mu_{см} = \mu_1 \cdot r_1 + \mu_2 \cdot r_2$.

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

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 $v_1 = \frac{R T_1}{p_1} = \frac{273,5 \cdot 1000}{1 \cdot 10^6} = 0,273 \text{ м}^3 / \text{кг}$.

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 $T_2 = T_1 = 1000 K$

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 $k=1,4$

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

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

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 $q=0$

Политронный процесс

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

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

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

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

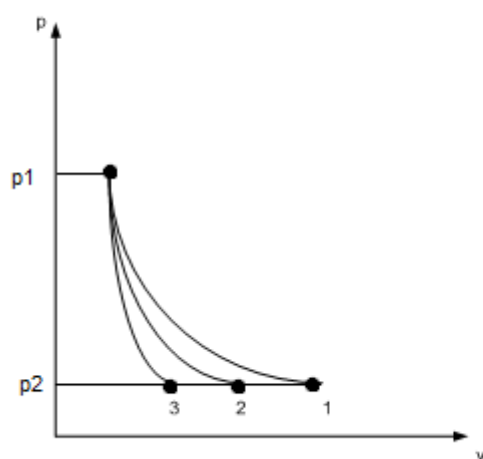
Результаты расчётов сводим в таблицу

Таблица 1

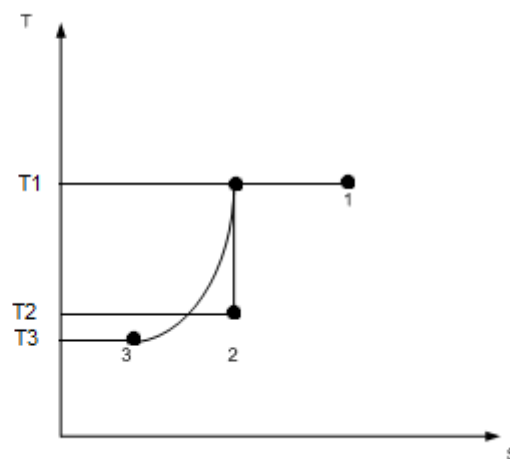
Процесс	$V_2, \text{м}^3/\text{кг}$	$T_2, ^\circ\text{K}$	Теплота $q_{1,2}, \text{КДж/кг}$	Работа $l_{1,2}, \text{КДж/кг}$
Изотермический	0,827	1000	30,257	30,257
Адиабатный	0,602	725	0	74,34
Политропный	0,546	660	-106,01	92,82

На основании расчётов строим графики процессов в $p-v$ и $T-s$ координатах

Процессы в $p-v$ координатах



Процессы в $T-s$ координатах



1 – Изотермический 2 – Адиабатный 3 – Политропный

Задача № 1

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 в $p-v$ и Ts - диаграммах. Данные, необходимые для решения задачи выбрать из таблицы 1.

Указание. Показатель адиабаты, а следовательно, и теплоемкости C_p и C_v следует принять постоянными, не зависящими от температуры.

Таблица1

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	05	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 параметров термодинамических процессов водяного пара

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 и таблицы 7 Приложения) удельные значения объема, энтальпии и энтропии насыщенной жидкости отмечаются одним штрихом, сухого 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.

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:

$$v = v'' \cdot x + v' \cdot (1-x),$$

$$h = h'' \cdot x + h' \cdot (1-x) = h' + r \cdot x,$$

$$s = s'' \cdot x + s' \cdot (1-x) = s' + (r \cdot x) / T_s$$

Степень сухости пара определяется по одной из следующих формул:

$$x = (s - s') / (s'' - s'),$$

$$x = (h - h') / (h'' - h'),$$

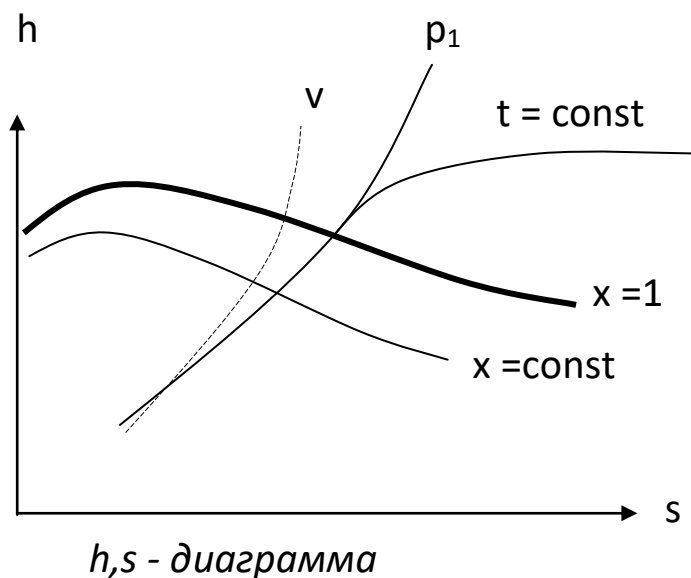
$$x = (v - v') / (v'' - v').$$

Для определения свойств в однофазном состоянии надо знать два параметра этого состояния - обычно давление и температуру. В ячейке таблицы, соответствующей данному состоянию, помещены удельных 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 диаграмме h-s 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.

Расчет 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. Способ расчета с помощью таблиц более точен и не имеет ограничений. Способ с использованием h,s - диаграммы более прост, нагляден, но возможен только для влажного насыщенного пара с $x > 0,6$, сухого насыщенного пара и перегретого 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 , работы ℓ приведены в таблице 2.

Таблица 2

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	$\ell = (u_2 - u_1)$	$q = 0$

Задача № 2

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 p,v , T,s и h,s – диаграммах. Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 3

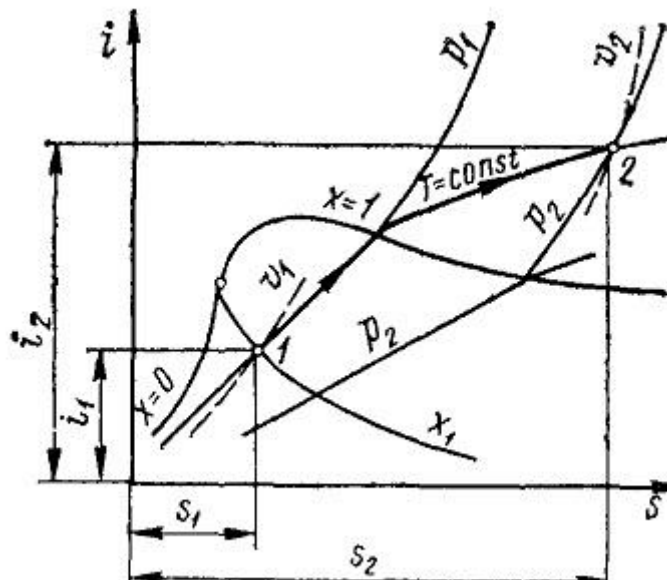
Таблица 3

Последняя цифра	p_1 , МПа	x_1	Предпоследняя цифра шифра	q , кДж/кг
-----------------	-------------	-------	---------------------------	--------------

шифра				
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 ($i-s$) диаграммы водяного пара.

Изотермический процесс в $i-s$ координатах



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 .

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

$$s_2 = \frac{q}{T} + s_1, \frac{\kappa_{Дж}}{\kappa_2 \cdot K}$$

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:

$$\Delta h = h_2 - h_1, \frac{\kappa_{Дж}}{\kappa_2} \quad (3)$$

Изменение энтропии:

$$\Delta s = s_2 - s_1, \frac{\kappa_{Дж}}{\kappa_2} \quad (4)$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1), \frac{\kappa_{Дж}}{\kappa_2} \quad (5)$$

Работа расширения:

$$l = q - \Delta u, \frac{\kappa_{Дж}}{\kappa_2} \quad (6)$$

Изобарный процесс в $i-s$ координатах

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = h_2 - h_1 - p(\nu_2 - \nu_1), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (10)$$

Работа расширения:

$$l = p(\nu_2 - \nu_1), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (11)$$

При заданных x_1 , 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 ($t = \text{const}$ и $p = \text{const}$), 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 hs - диаграммой, параметры конечного состояния пара, работу расширения, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии. Решить также задачу, если расширение происходит изобарно. Изобразить процессы в $p\nu$ -, Ts - и hs - диаграммах.

Решение:

Изотермический процесс расширения

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

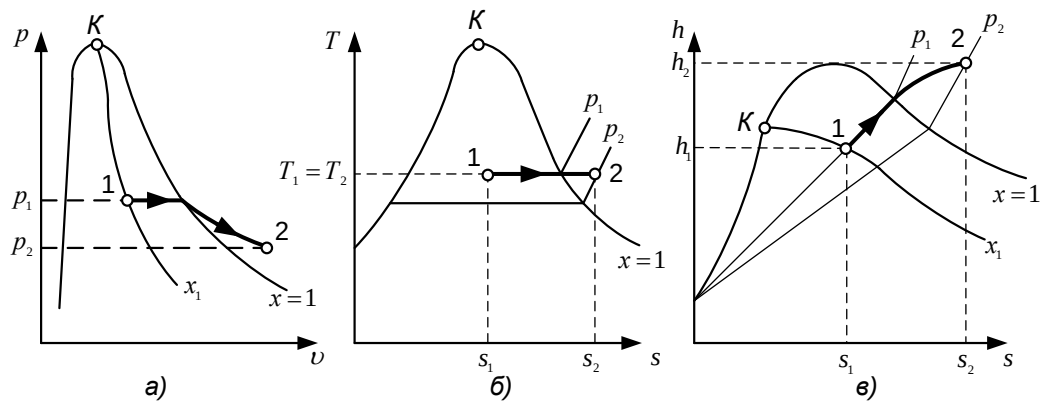


Рисунок 4 - Изотермический процесс расширения в $p-v$, $T-s$ и $h-s$ - диаграммах

Количество теплоты, подведенной в изотермическом процессе:

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

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

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

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

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: $p_2 = 1,742 \text{ МПа}$ $t_2 = 264^\circ\text{C}$,

$$h_2 = 2948 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad s_2 = 6,691 \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{K})}, \quad v_2 = 0,134 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Изменение энтальпии:

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

$$\Delta h = 2948 - 2680 = 268 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Изменение энтропии:

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

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

Изменение внутренней энергии:

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

$$\Delta u = 2948 - 2680 - (1,742 \cdot 10^3 \cdot 0,134 - 5,0 \cdot 10^3 \cdot 0,037) = 220 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Работа расширения:

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

$$l = 480 - 220 = 260 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Изобарный процесс расширения

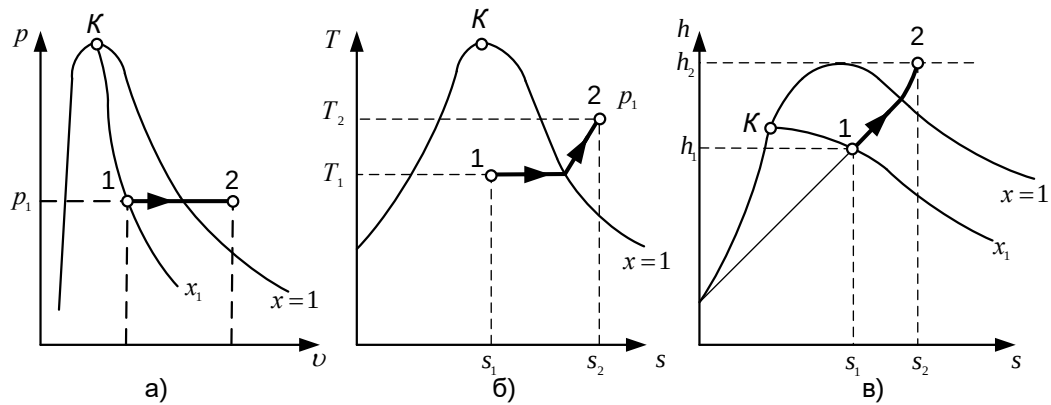


Рисунок 5 - Изобарный процесс расширения в $p-v$, $T-s$ и $h-s$ - диаграммах

Количество теплоты, подведенной в изобарном процессе:

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

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

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

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

На $h-s$ - диаграмме 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:

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

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

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = h_2 - h_1 - p(\nu_2 - \nu_1), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (10)$$

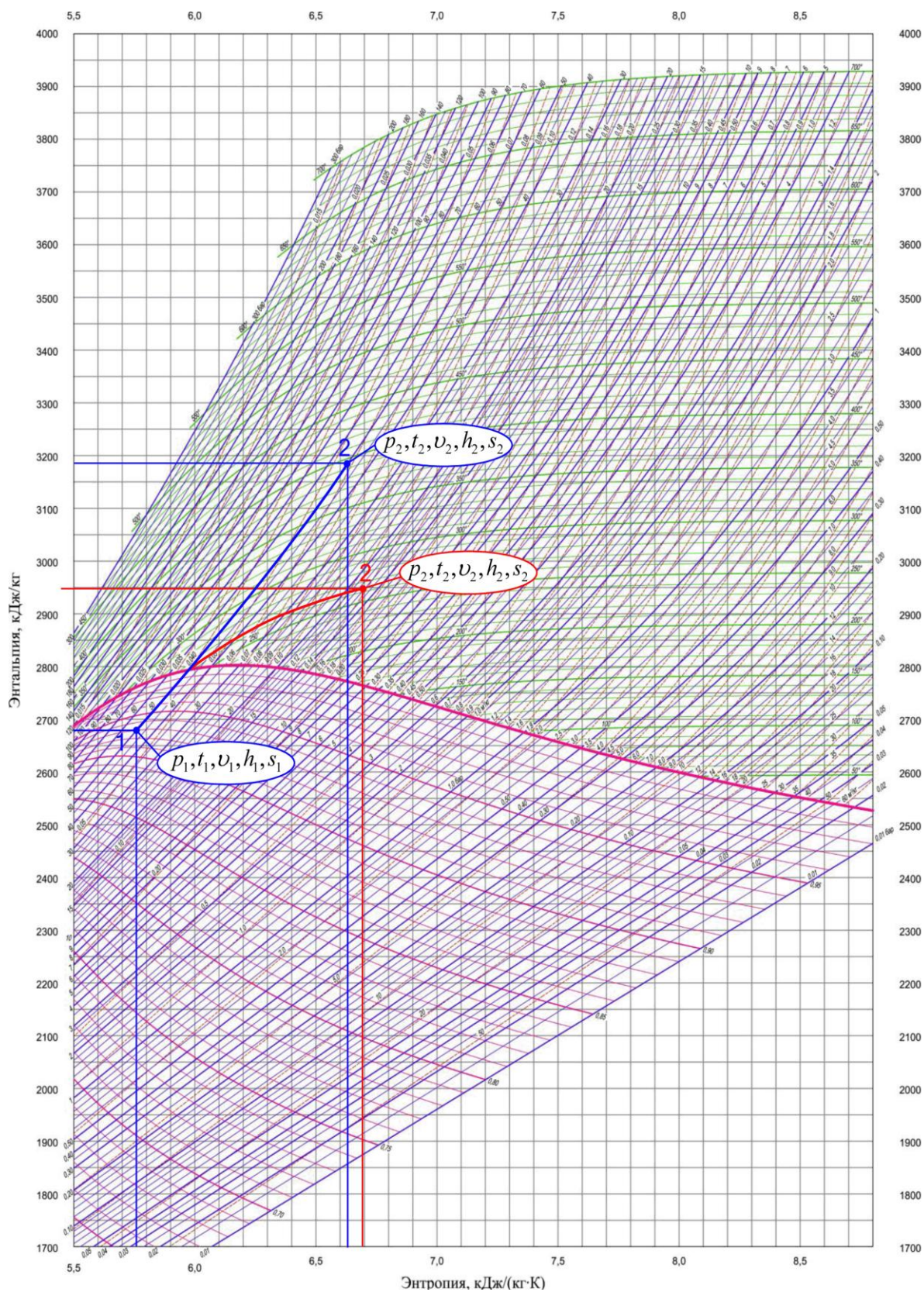
$$\Delta u = 3160 - 2680 - 5,0 \cdot 10^3 (0,057 - 0,037) = 400 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Работа расширения:

$$l = p(\nu_2 - \nu_1), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (11)$$

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

При заданных x_1 , 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 ($t = \text{const}$ и $p = \text{const}$), так как в области влажного пара на $h - s$ - диаграмме изобары совпадают с изотермами.



$h - s$ - диаграмма

Задача № 2

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 $p-v$, $T-s$ и $h-s$ – диаграммах. Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 3

Таблица 3

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 ($i-s$) диаграммы 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

$$D = d \cdot N,$$

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

Энтальпия пара перед турбиной определяется по параметрам перегретого пара: давлению p_1 и температуре t_1 (по hs -диаграмме). 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 посхеме (hS -диаграмма x_{2d})

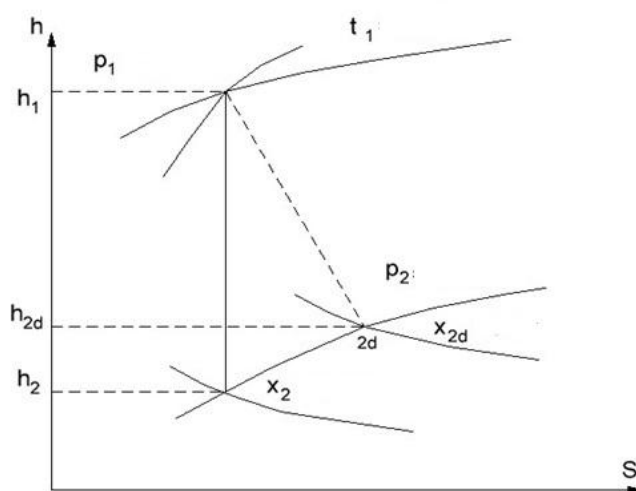


Рисунок 2 - hS -диаграмма

4. Абсолютный электрический КПД турбогенератора

$$\eta_a = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_3,$$

где η_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 η_m и КПД электрогенератора η_g принять $\eta_m = \eta_g = 0,99$. Определить также степень сухости пара в конце теоретического и действительного процессов расширения (изобразив процессы в hs диаграмме) и абсолютный электрический КПД турбогенератора. Мощностью привода питательного насоса пренебречь.

Решение:

1. 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.

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

2. Часовой расход пара

$$D = d \cdot N,$$

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

3. 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 hS-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 hS-диаграмме.

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

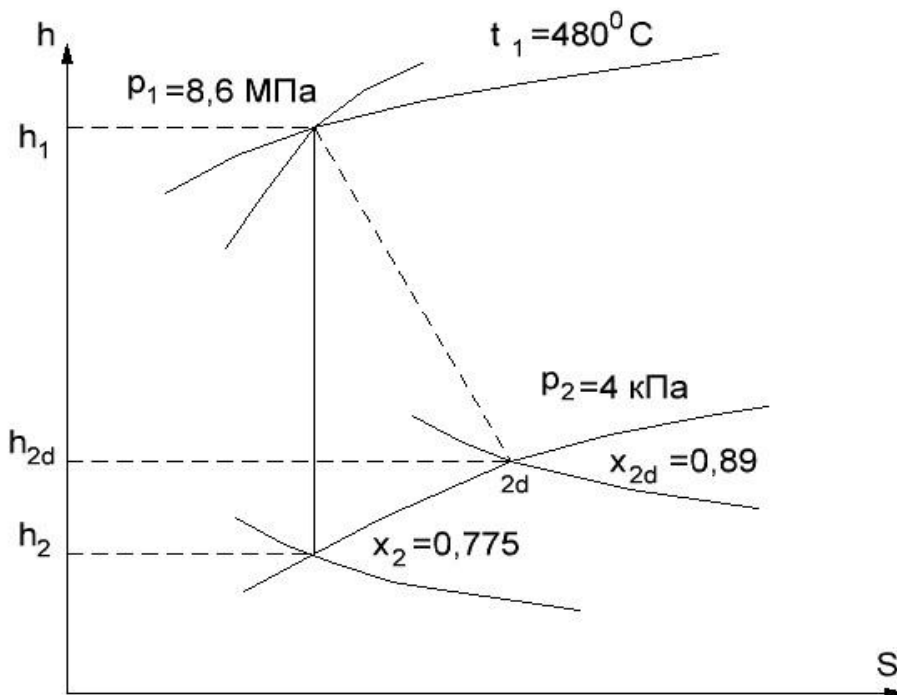


Рисунок 2 - hS-диаграмма

4. Абсолютный электрический КПД турбогенератора

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

где η_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.

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 ?

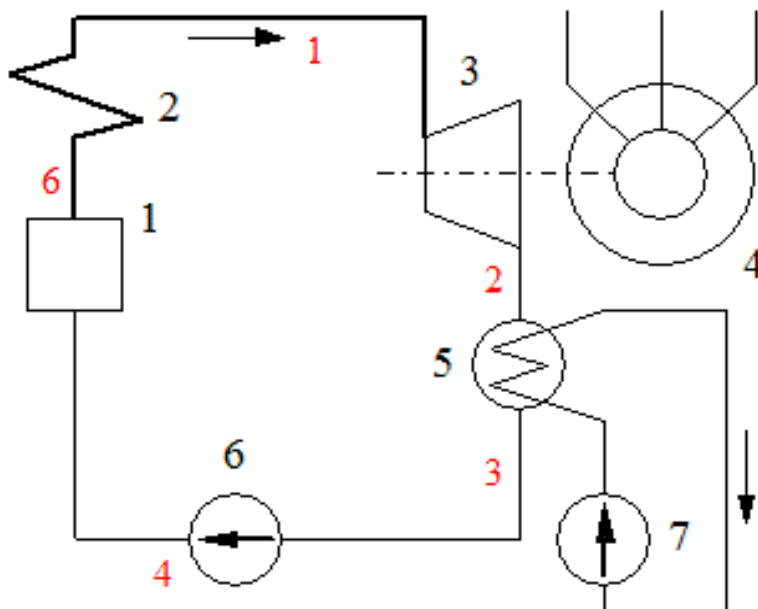


Рисунок 3 – Схема паросиловой установки

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).

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.

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 предыдущая.

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 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 подает 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.

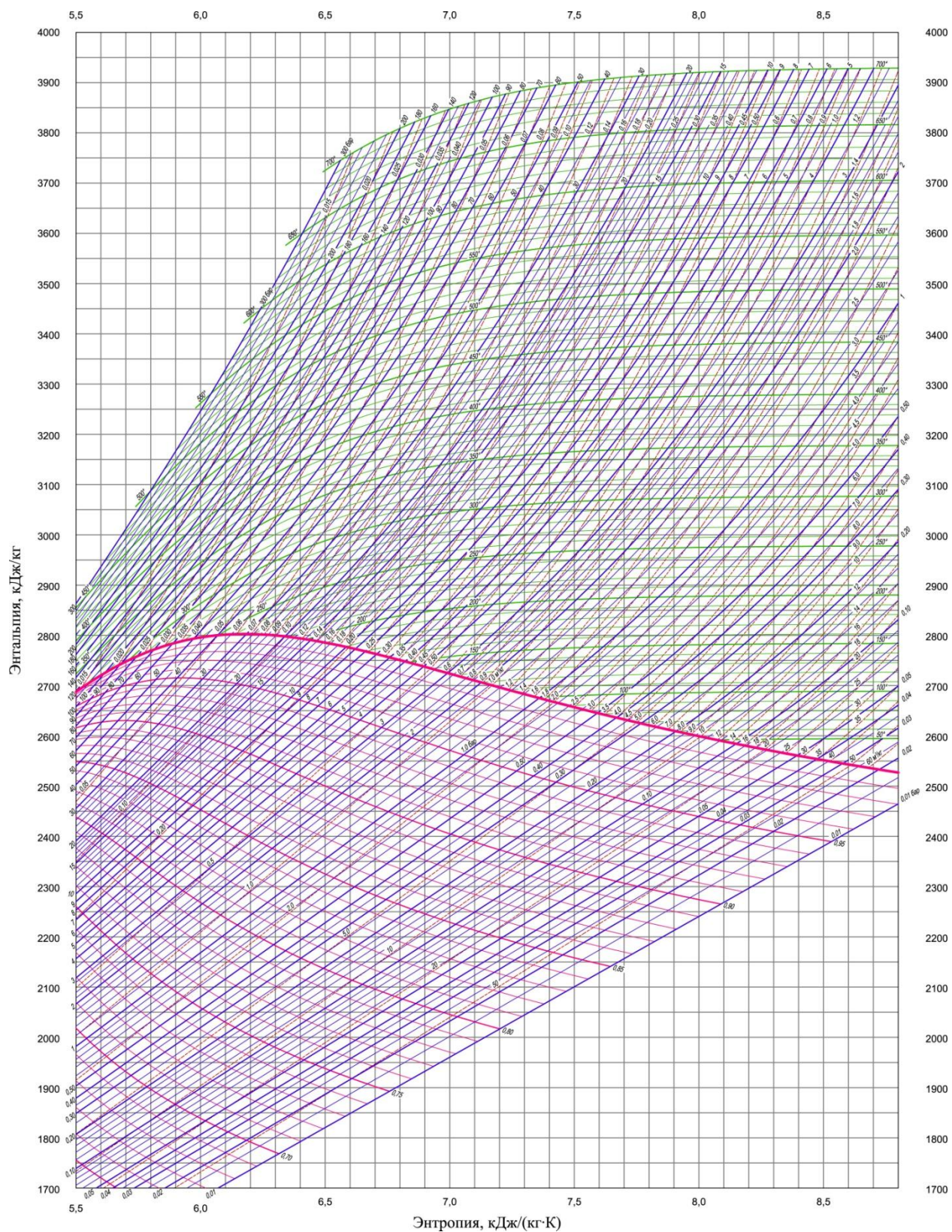
Задача № 3

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 $N_{эл.}$, давлению p_1 и температуре t_1 перегретого пара перед турбиной и относительному внутреннему КПД турбины η_{oi} . Давление пара в конденсаторе принять $p_2 = 4$ кПа. Механический КПД турбины η_m и КПД электрогенератора η_g принять $\eta_m = \eta_g = 0,99$. Определить также степень сухости пара в конце теоретического и действительного процессов расширения (изобразив процессы в hs диаграмме) и абсолютный электрический КПД турбогенератора. Мощностью привода питательного насоса пренебречь. Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 4

Таблица 4

Последняя цифра шифра	$N_{эл.}$ МВт	η_{oi}	Предпоследняя цифра шифра	p_1 , МПа	t_1 , °C
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 ?



h-s диаграмма водяного пара

Савельев Виктор Андреевич

Методические указания

к выполнению самостоятельной работы
по дисциплине «Техническая термодинамика»
для бакалавров направлений 13.03.01, 13.03.02.

Редактор

Подписано в печать	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. 65 гр м. ²
Печать цифровая	Усл.печ.л. 1,25	Уч.-изд. л.
Заказ	Тираж 50	не для продажи

РИЦ Курганского государственного университета.
640000, г. Курган, ул. Советская, 63/4.
Курганский государственный университет.