

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра ЮНЕСКО
«Энергосбережение и возобновляемые источники энергии»

Н.Г. Хутская
Г.И. Пальченок

**РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В ВОДЯНОМ ПАРЕ**

**Методическое пособие
по дисциплине «Термодинамика» для студентов
специальности 1–43 01 06 «Энергоэффективные
технологии и энергетический менеджмент»**

**Минск
БНТУ
2012**

УДК 621.1.016.7(075.8)

ББК 31.31я7

X98

Хутская Н.Г.

X98 Расчет термодинамических процессов в водяном паре: методическое пособие по дисциплине «Термодинамика» для студентов специальности 1–43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» / Н.Г. Хутская, Г.И. Пальченок. – Минск: БНТУ, 2012. – 45 с.

ISBN 978-985-550-033-0.

Рассмотрены методы расчета термодинамических процессов с использованием таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара, **h, s**- и **T, s**- диаграмм.

Методическое пособие составлено в соответствии с учебным планом кафедры ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии» по дисциплине «Термодинамика» для студентов специальности 1–43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент».

Настоящее методическое пособие издано благодаря спонсорской поддержке норвежской фирмы New Energy Performance AS (NEPAS).

УДК 621.1.016.7(075.8)

ББК 31.31я7

ISBN 978-985-550-033-0

© Хутская Н.Г., Пальченок Г.И., 2012

© Белорусский национальный
технический университет, 2012

ОБОЗНАЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИН

t °С - температура.

T , К - абсолютная температура,

p , Па - давление.

v , м³/кг - удельный объем.

G , кг - масса.

h , кДж/кг - удельная энтальпия.

u , кДж/кг - удельная внутренняя энергия.

l , кДж/кг - удельная работа.

q , кДж/кг - удельная теплота.

s , кДж/кг К - удельная энтропия.

x - степень сухости.

y - степень влажности.

Индексы

' - кипящая жидкость.

'' - сухой насыщенный пар.

ж - жидкость.

п - пар.

дв - двухфазная смесь.

1 - начало процесса.

2 - конец процесса.

РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВОДЯНОМ ПАРЕ ПО ТАБЛИЦАМ И ДИАГРАММАМ

Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара

Таблица 1

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температурам)

t	T	p	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''	$s''-s'$

Таблица 2

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлениям)

p	t	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''	$s''-s'$

Таблица 3

Термодинамические свойства воды и перегретого пара

t	p_1			p_2			p_3						
	t_{s1}			t_{s2}			t_{s3}						
	v'_1		v''_1	v'_2		v''_2	v'_3		v''_3				
	h'_1		h''_1	h'_2		h''_2	h'_3		h''_3				
	s'_1		s''_1	s'_2		s''_2	s'_3		s''_3				
	v_1	h_1	s_1	v_2	h_2	s_2	v_3	h_3	s_3				
t_1			в	о	д		а						
t_2													
t_3													
t_4	п	е	р	е	г	р	е	т	ы	й	п	а	р

Пар, находящийся в равновесии с жидкостью, называется **насыщенным**. Насыщенный пар имеет температуру кипящей жидкости, из которой он получен.

Если в насыщенном паре присутствуют капли жидкости, то такой пар называется **влажным насыщенным** (двухфазная система - пар плюс жидкость)

Если все присутствующие во влажном насыщенном паре капли жидкости обратились в пар, то такой пар называется **сухим насыщенным**.

Пар, имеющий температуру более высокую, чем температура кипения при данном давлении, называется **перегретым**.

При одном давлении кипящая жидкость, влажный насыщенный пар и сухой насыщенный пар имеют одну и ту же температуру - **температуру насыщения**.

В таблицах параметры кипящей жидкости обозначены как параметры с одним штрихом (v', h', s'); параметры сухого насыщенного пара - как параметры с двумя штрихами (v'', h'', s'').

В двухфазной системе (влажном насыщенном паре) параметры определяются следующим образом.

Масса двухфазной смеси

$$G_{\text{ов}} = G_{\text{жс}} + G_n$$

где $G_{\text{жс}}, G_n$ - соответственно масса насыщенной (кипящей) жидкости и сухого насыщенного пара.

Степень сухости

$$x = \frac{G_n}{G_{\text{ов}}} = \frac{G_n}{G_{\text{жс}} + G_n}$$

Степень влажности

$$y = \frac{G_{\text{жс}}}{G_{\text{ов}}} = \frac{G_{\text{жс}}}{G_{\text{жс}} + G_n} = 1 - x$$

Для насыщенной (кипящей) жидкости $x=0$, для сухого насыщенного пара $x=1$, для влажного насыщенного пара $0 < x < 1$.

Удельные значения объема, энтальпии, энтропии влажного насыщенного пара определяются по формулам

$$v_{\text{дв}} = v''x + v'(1 - x)$$

$$h_{\text{дв}} = h''x + h'(1 - x)$$

$$s_{\text{дв}} = s''x + s'(1 - x)$$

Состояние двухфазной системы определяется температурой (или однозначно связанным с ней давлением насыщения) и степенью сухости.

При известных параметрах двухфазной системы можно определить степень сухости из соотношений

$$x = \frac{v_{\text{дв}} - v'}{v'' - v'} = \frac{h_{\text{дв}} - h'}{h'' - h'} = \frac{s_{\text{дв}} - s'}{s'' - s'}$$

Параметры кипящей жидкости и сухого насыщенного пара определяются по таблицам термодинамических свойств по известной температуре (давлению).

Расчет изобарного процесса $p = \text{const}$

I. Процесс начинается в области жидкости и заканчивается в области перегретого пара. Задано p, t_1, t_2 .

Обычно расчет изобарного процесса в этом варианте проводится с помощью таблиц. По таблице 3 по температуре t_1 и давлению p определяются v_1, h_1, s_1 . По той же таблице по температуре t_2 и давлению p определяется v_2, h_2, s_2 .

Подведенная в процессе теплота

$$q = h_2 - h_1;$$

работа

$$l = p(v_2 - v_1)$$

изменение внутренней энергии

$$\Delta u = q - l.$$

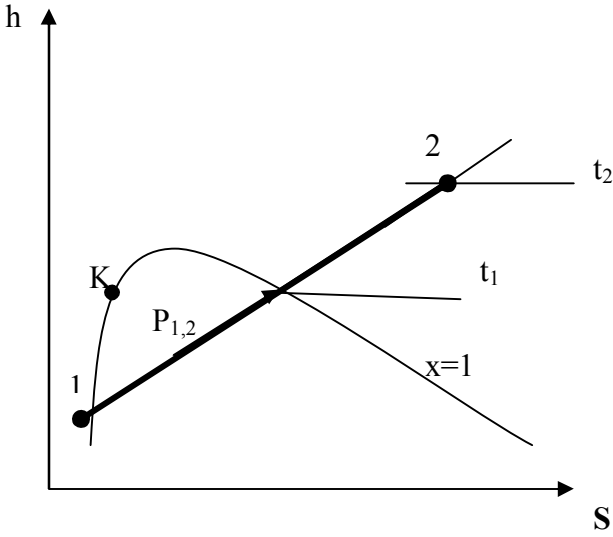


Рисунок 1а

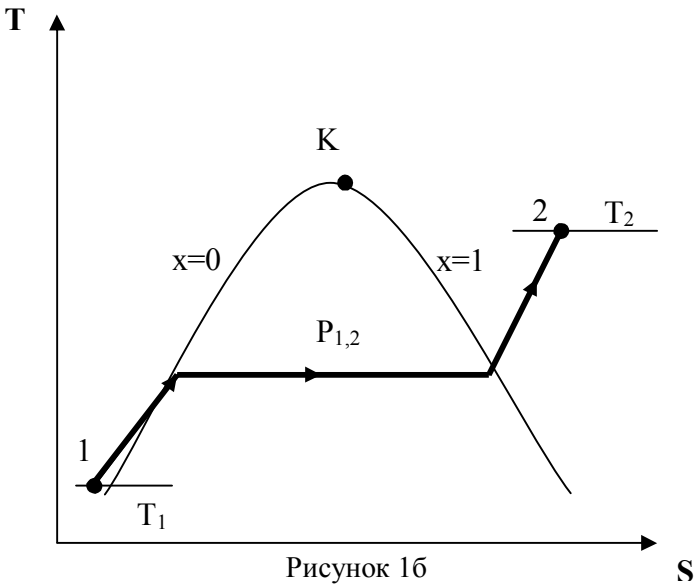


Рисунок 1б

II. Процесс начинается в области влажного пара и заканчивается в области перегретого. Задано p, x_1, t_2 .

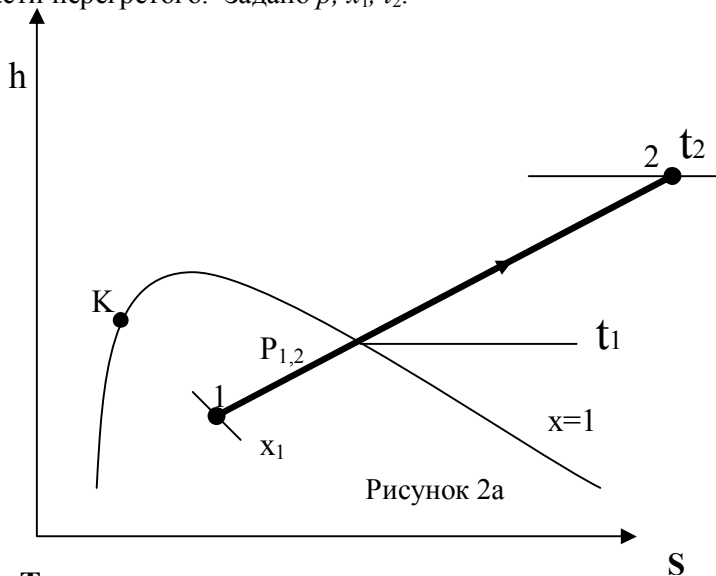


Рисунок 2а

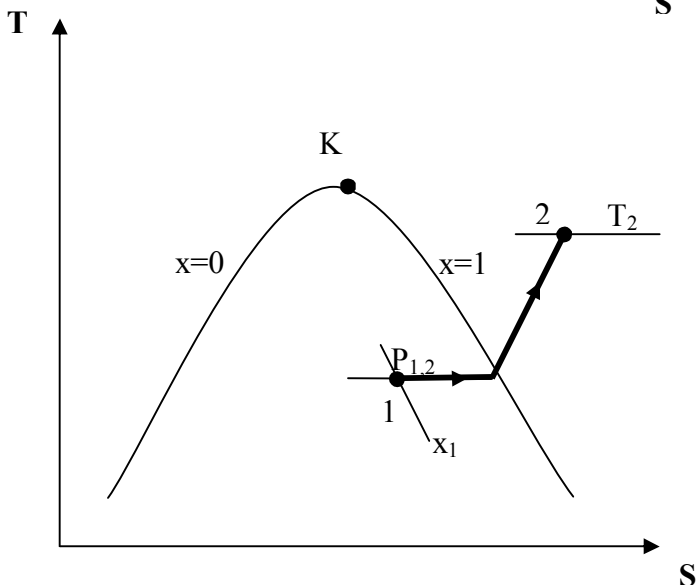


Рисунок 2б

По таблице 2 по давлению p определяются $v', v'', h', h'', s', s''$. Точка 1 лежит в двухфазной области насыщенного пара. Параметры точки

$$v_1 = v''x_1 + v'(1 - x_1)$$

$$h_1 = h''x_1 + h'(1 - x_1)$$

$$s_1 = s''x_1 + s'(1 - x_1)$$

По таблице 3 по температуре t_2 и давлению p определяются v_2, s_2, h_2 . Теплота, работа и изменение внутренней энергии определяются по вышеприведенным формулам.

III. Процесс начинается и заканчивается в области влажного пара.

Задано: p, x_1, x_2 .

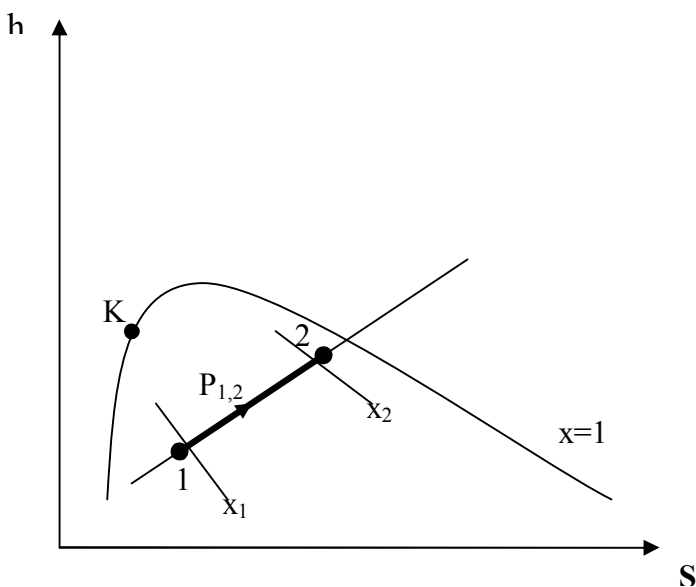


Рисунок 3а

По таблице 2 по давлению p определяются $v', v'', h', h'', s', s''$. Точки 1 и 2 находятся в двухфазной области насыщенного пара.

Параметры точки 1

$$v_1 = v''x_1 + v'(1 - x_1)$$

$$h_1 = h''x_1 + h'(1 - x_1)$$

$$s_1 = s''x_1 + s'(1 - x_1)$$

Параметры точки 2

$$v_2 = v''x_2 + v'(1 - x_2)$$

$$h_2 = h''x_2 + h'(1 - x_2)$$

$$s_2 = s''x_2 + s'(1 - x_2)$$

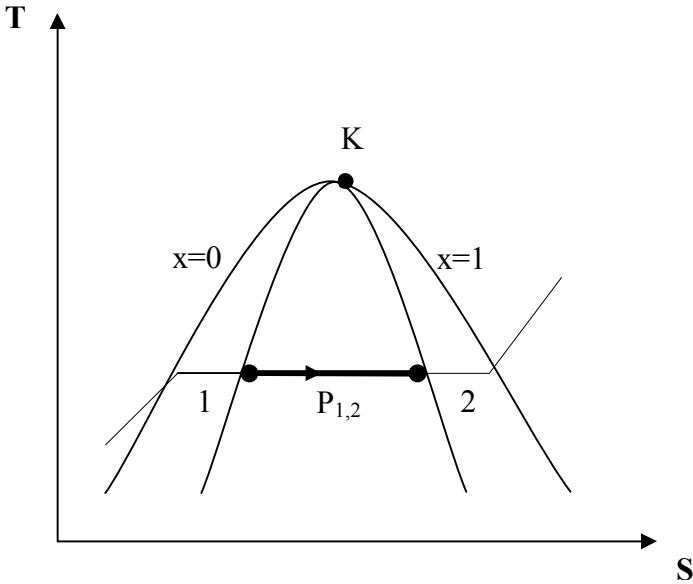


Рисунок 3б

Теплота, работа и изменение внутренней энергии определяются по вышеприведенным формулам.

IV. Процесс начинается и заканчивается в области перегретого пара.

Задано: p, T_1, T_2 .

По таблице 3 по давлению p и температуре t_1 определяются v_1, h_1, s_1 . По той же таблице по давлению p и температуре t_2 определяются v_2, h_2, s_2 . Дальнейший расчет ведется по тем же формулам.

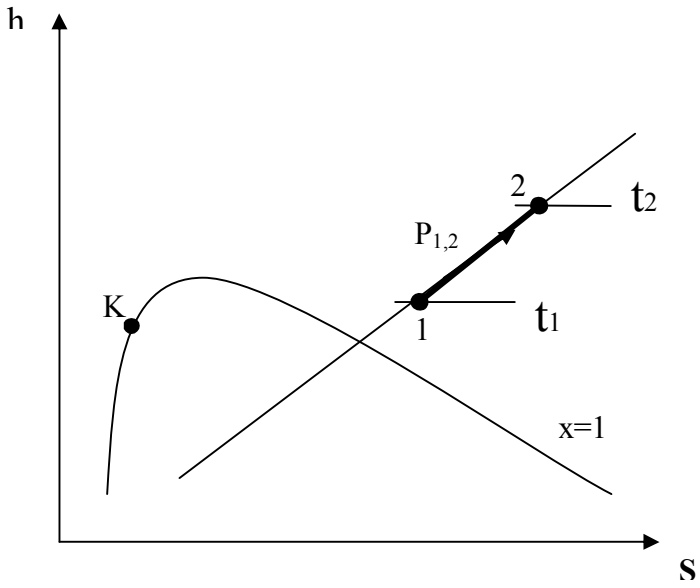


Рисунок 4а

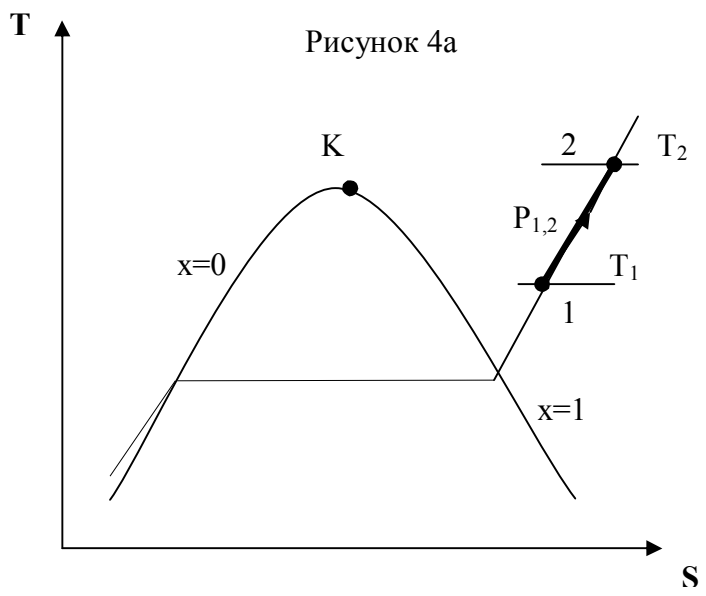


Рисунок 4б

Расчет изотермического процесса $T = const$

I. Процесс начинается в области жидкости и заканчивается в области перегретого пар. Задано: p_1, T, p_2 .

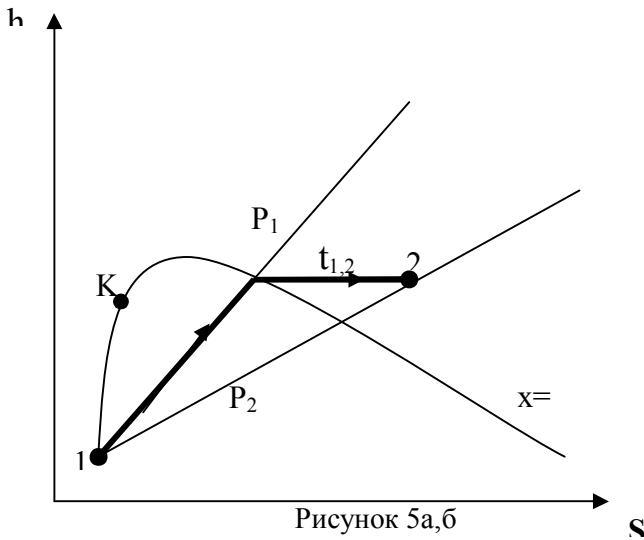
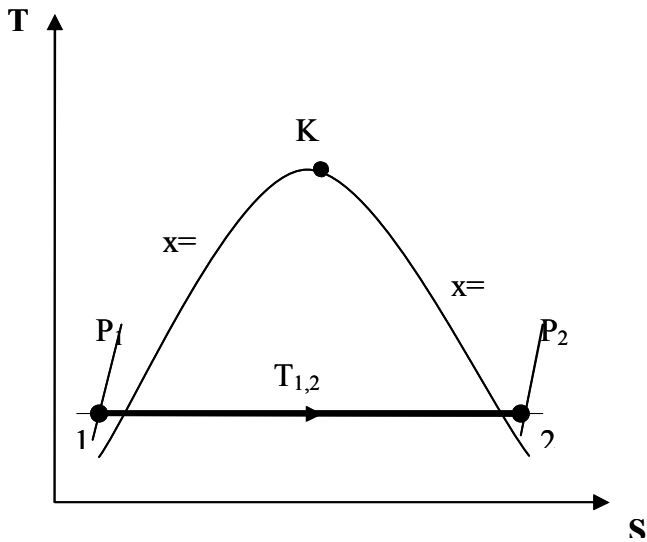


Рисунок 5а,б



По таблице 3 по температуре T и давлению p_1 определяются v_1, h_1, s_1 . По той же таблице по температуре T и давлению p_2 определяются v_2, h_2, s_2 .

Подведенная теплота $q = T(s_2 - s_1)$.

Изменение внутренней энергии $\Delta u = (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1)$.

Работа процесса $l = q - \Delta u$.

II. Процесс начинается и заканчивается в области влажного пара

Задано: T, x_1, x_2 .

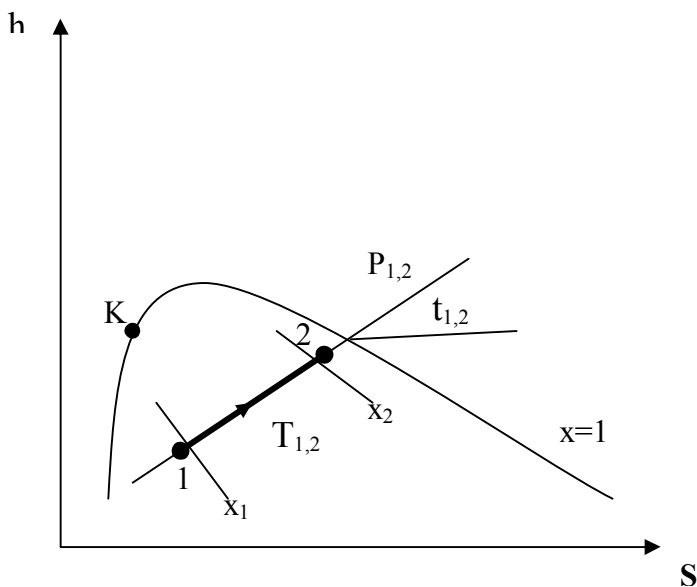


Рисунок 6а

По таблице 1 по температуре T определяются параметры $v', v'', h', h'', s', s''$ на пограничных кривых

$$v_1 = v''x_1 + v'(1 - x_1)$$

$$h_1 = h''x_1 + h'(1 - x_1)$$

$$s_1 = s''x_1 + s'(1 - x_1)$$

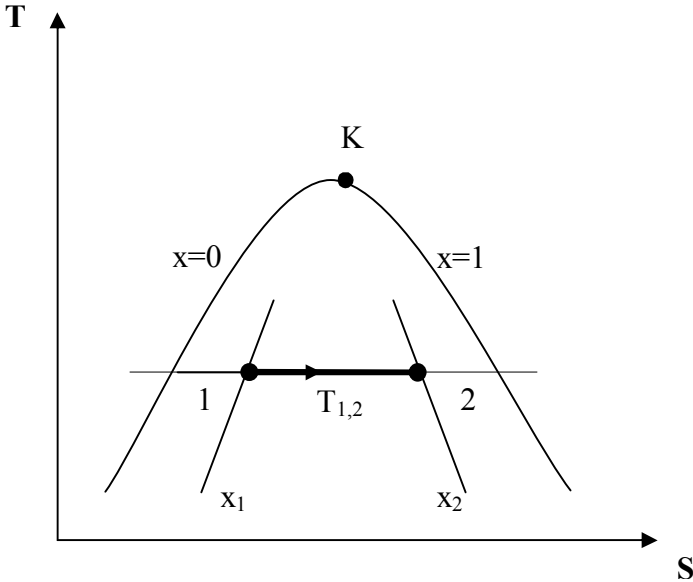


Рисунок 6б

Далее определяются параметры в точке 2

$$v_2 = v''x_2 + v'(1 - x_2)$$

$$h_2 = h''x_2 + h'(1 - x_2)$$

$$s_2 = s''x_2 + s'(1 - x_2)$$

Дальнейший расчет ведется по вышеприведенным формулам.

III. Процесс начинается в области влажного пара и заканчивается в области перегретого.

Задано T, x_1, p_2 .

По таблице 1 по температуре T определяются параметры на пограничных кривых $v', v'', h', h'', s', s''$.

$$v_1 = v''x_1 + v'(1 - x_1)$$

$$h_1 = h''x_1 + h'(1 - x_1)$$

$$s_1 = sh''x_1 + s'(1 - x_1)$$

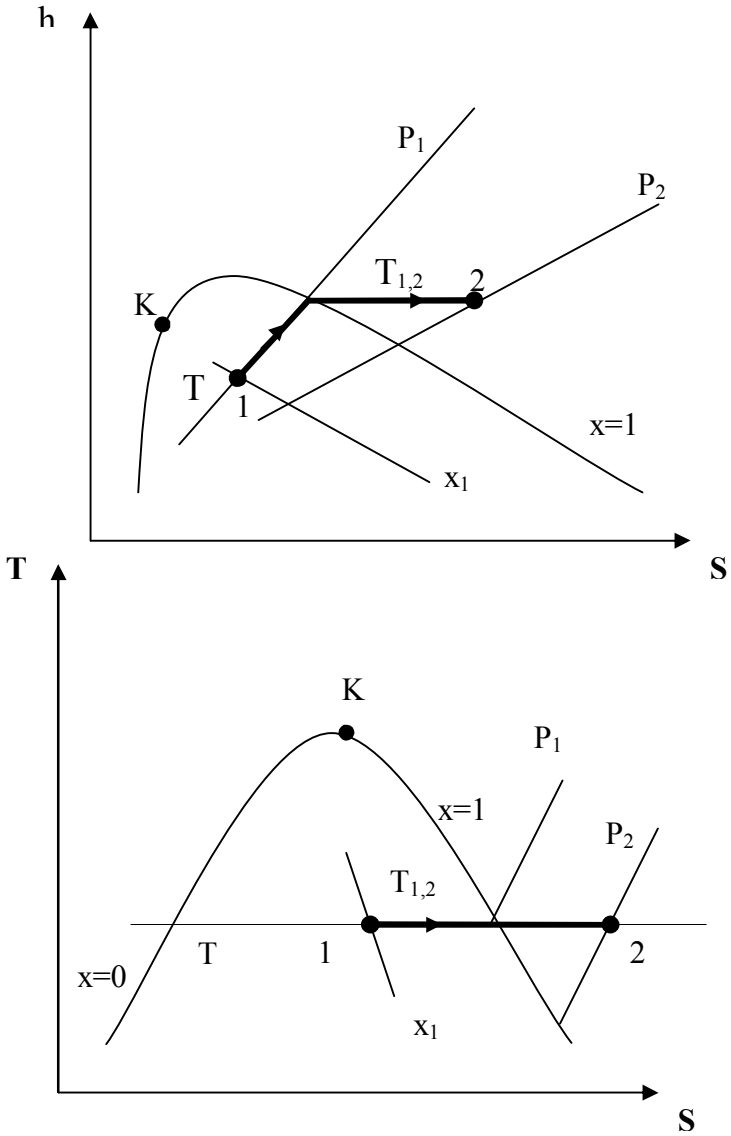


Рисунок 7 а,б

По таблице 3 по температуре T и давлению p_2 определяются параметры в точке 2: v_2, h_2, s_2 .

Дальнейший расчет ведется по вышеприведенным формулам.

IV. Процесс целиком располагается в области перегретого пара

Задано T, p_1, p_2 .

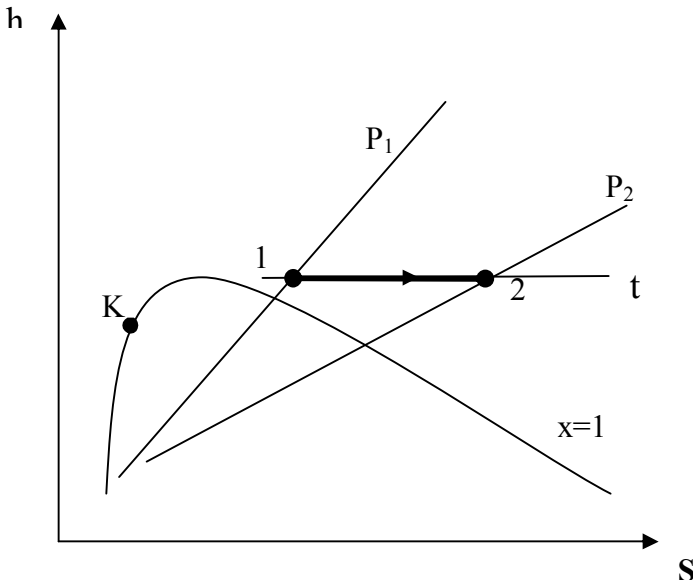


Рисунок 8а

По таблице 3 по T и p_1 определяются параметры в точке 1 v_1, h_1, s_1 .

По той же таблице по T и p_2 определяются параметры в точке 2 v_2, h_2, s_2 .

Дальнейший расчет ведется по вышеприведенным формулам.

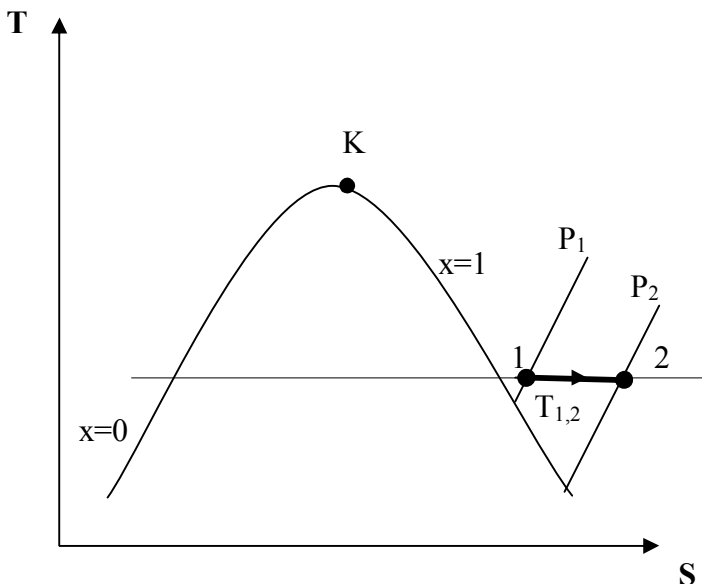


Рисунок 8б

Расчет изохорного процесса $V=const$

I. Процесс начинается и заканчивается в области влажного пара

Задано p_1, x_1, p_2 (или t_2).

По таблице 2 по давлению p_1 определяются параметры на пограничных кривых $v_1', v_1'', h_1', h_1'', s_1', s_1''$ и рассчитываются параметры в точке 1

$$v_1 = v_1''x_1 + v_1'(1 - x_1)$$

$$h_1 = h_1''x_1 + h_1'(1 - x_1)$$

$$s_1 = s_1''x_1 + s_1'(1 - x_1)$$

По таблице 2 по давлению p_2 (или по таблице 1 по температуре T_2) определяются параметры на пограничных кривых $v_2', v_2'', h_2', h_2'', s_2', s_2''$. Учитывая, что $v_2 = v_1$, можно определить степень сухости в точке 2. Удельный объем в точке 2 можно записать

$$v_2 = v_2''x_2 + v_2'(1 - x_2)$$

Отсюда

$$x_2 = \frac{v_2 - v_2'}{v_2'' - v_2'}$$

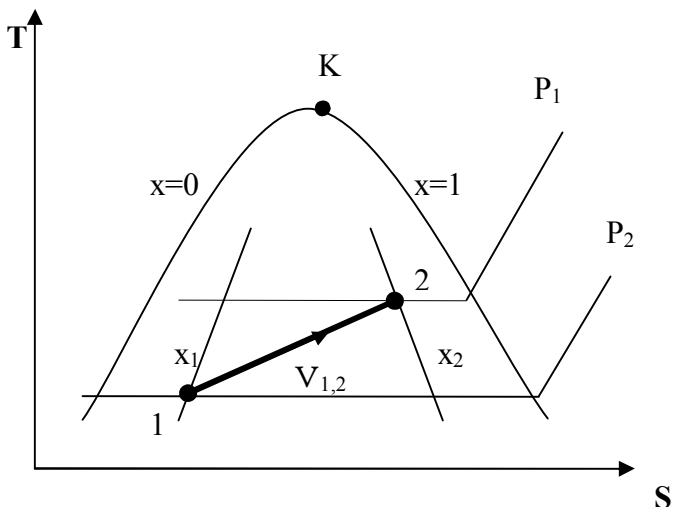
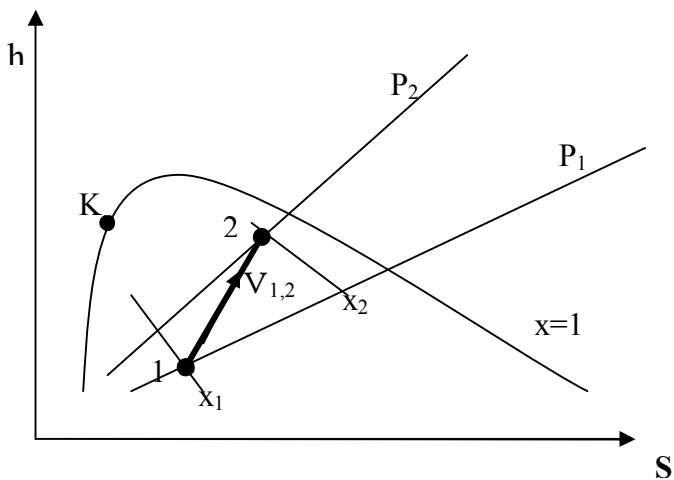


Рисунок 9а,б

Зная x_2 , можно определить параметры в точке 2.

$$h_2 = h_2''x_2 + h_2' (1 - x_2)$$

$$s_2 = s_2''x_2 + s_2' (1 - x_2)$$

В изохорном процессе $l=0$.

Подведенная теплота равна изменению внутренней энергии

$$q = u_2 - u_1 = (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1).$$

II. Процесс начинается в области влажного пара и заканчивается в области перегретого пара

Задано p_1, x_1, p_2 (или t_2).

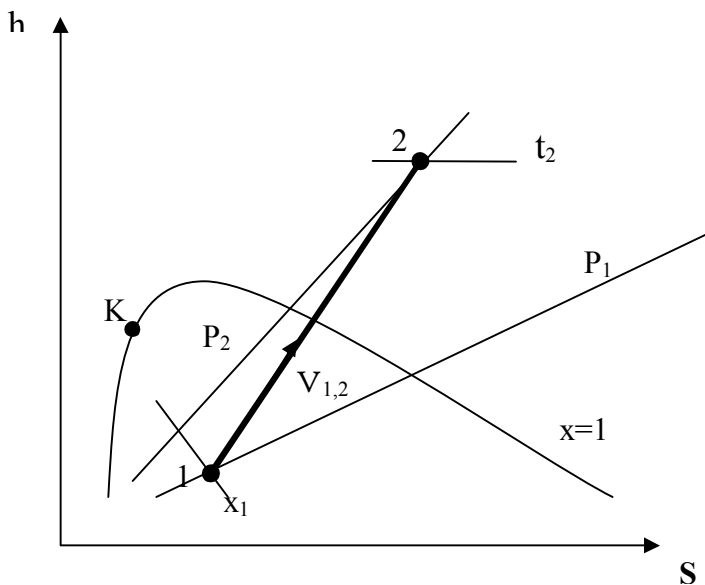


Рисунок 10а

По таблице 2 по давлению p_1 определяются параметры на граничных кривых $v_1', v_1'', h_1', h_1'', s_1', s_1''$.

Проводится расчет параметров в точке 1.

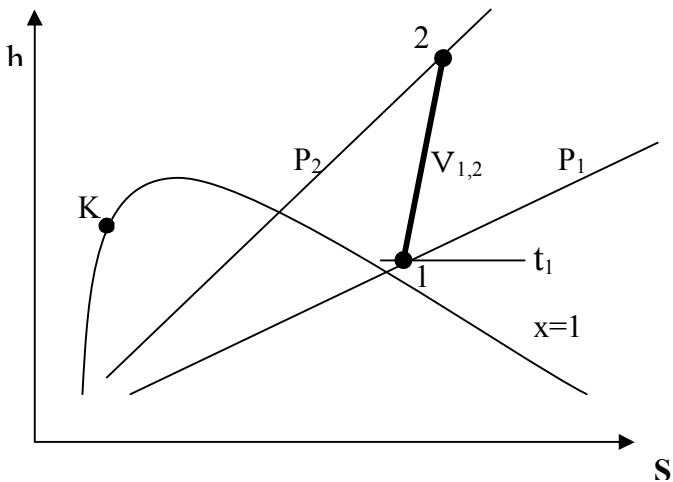


Рисунок 11а

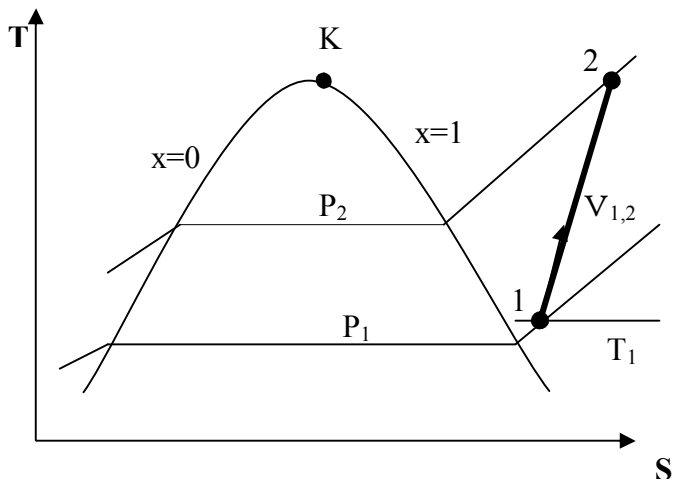


Рисунок 11б

Расчет адиабатного процесса $dq=0$

I. Процесс целиком располагается в области перегретого пара
 Задано p_1 , t_1 и p_2 .

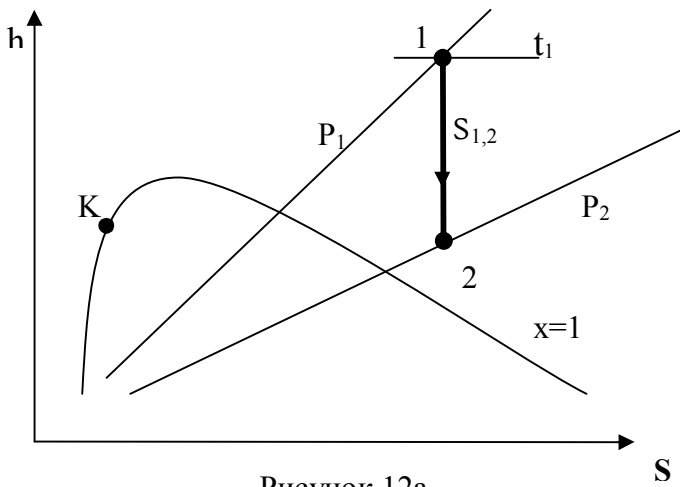


Рисунок 12а

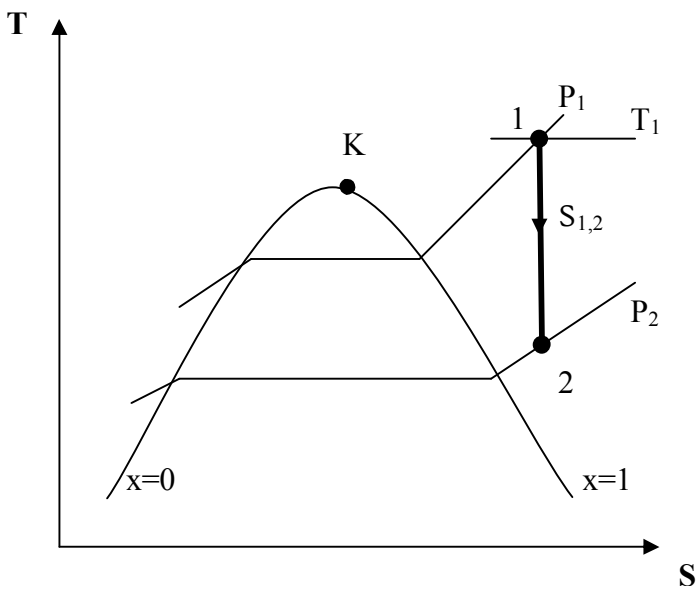


Рисунок 12б

По таблице 3 по давлению p_1 и температуре t_1 определяются параметры в точке 1 v_1, h_1, s_1 .

В обратимом адиабатном процессе $ds = 0, s = \text{const}$.

По таблице 3 по давлению p_2 и $s_2 = s_1$ определяются v_2, h_2, t_2 .

Для адиабатного процесса $dq=0$.

$$\Delta u = -l = (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1).$$

II. Процесс начинается в области перегретого пара и заканчивается в области влажного.

Задано p_1, t_1 и p_2 .

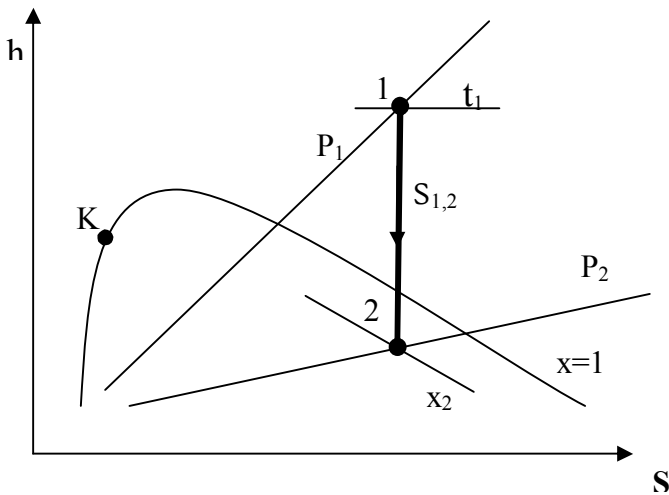


Рисунок 13а

По таблице 3 по давлению p_1 и температуре t_1 определяют h_1, s_1, v_1 .

По таблице 2 по давлению p_2 определяются параметры $h_2'', h_2', s_2'', s_2', v_2'', v_2'$.

Поскольку

$$s_2 = s_2'' x_2 + s_2' (1 - x_2) = s_1,$$

можно определить степень сухости во второй точке

$$x_2 = \frac{s_2 - s_2'}{s_2'' - s_2'}$$

Затем определяются

$$h_2 = h_2''x_2 + h_2'(1 - x_2)$$

$$v_2 = v_2''x_2 + v_2'(1 - x_2)$$

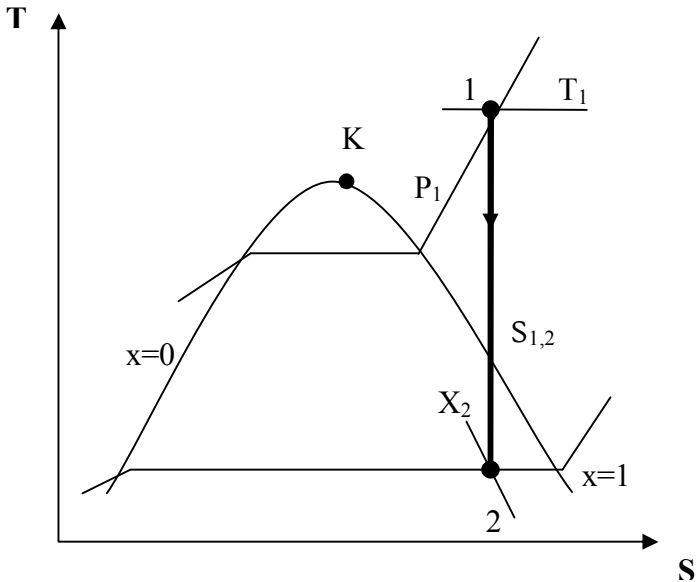


Рисунок 136

Расчет остальных параметров ведется по вышеприведенным формулам.

III. Процесс начинается и заканчивается в области влажного пара.

Задано p_1 , x_1 и p_2 .

По таблице 2 по давлению p_1 определяются параметры на пограничных кривых h_1'' , h_1' , s_1'' , s_1' , v_1'' , v_1' .

Параметры в точке 1

$$v_1 = v_1''x_1 + v_1'(1 - x_1)$$

$$h_1 = h_1''x_1 + h_1'(1 - x_1)$$

$$s_1 = s_1''x_1 + s_1'(1 - x_1)$$

По таблице 2 по давлению P определяются h_2'' , h_2' , s_1'' , s_2' , v_2'' , v_2' .

$$s_2 = s_1 = s_2''x_2 + s_2'(1 - x_2).$$

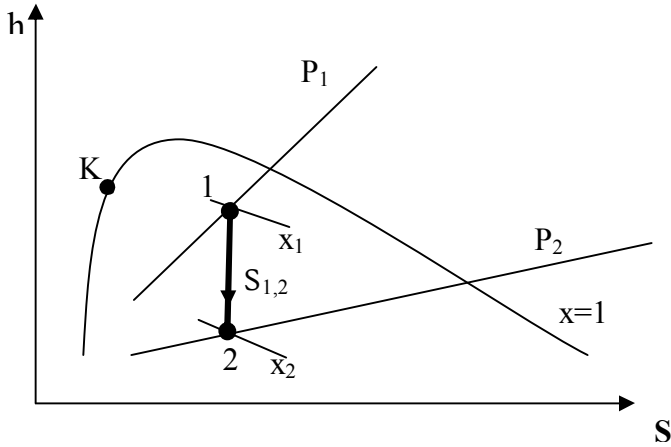


Рисунок 14а

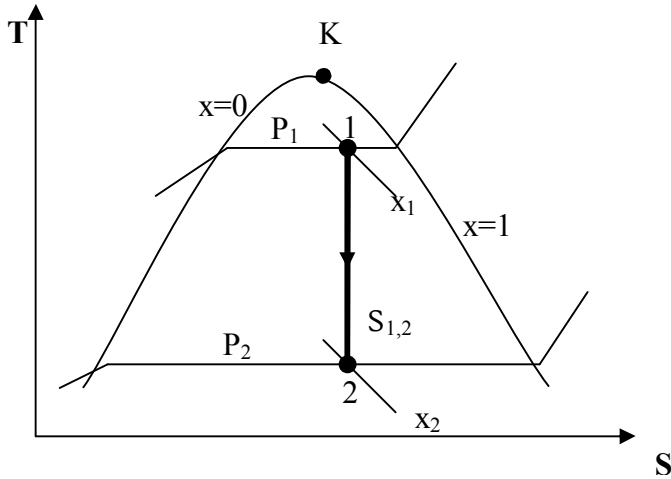


Рисунок 14б

Отсюда определяется степень сухости во второй точке

$$x_2 = \frac{s_2 - s_2'}{s_2'' - s_2'}$$

Далее определяются

$$h_2 = h_2''x_2 + h_2'(1 - x_2)$$

$$v_2 = v_2''x_2 + v_2'(1 - x_2)$$

Расчет остальных параметров ведется по вышеприведенным формулам.

Расчет процесса адиабатного дросселирования $h=const$

I. Процесс начинается и заканчивается в области влажного пара

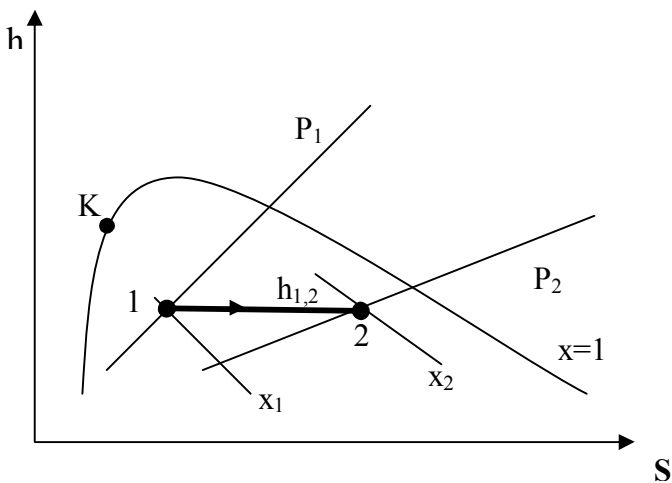


Рисунок 15а

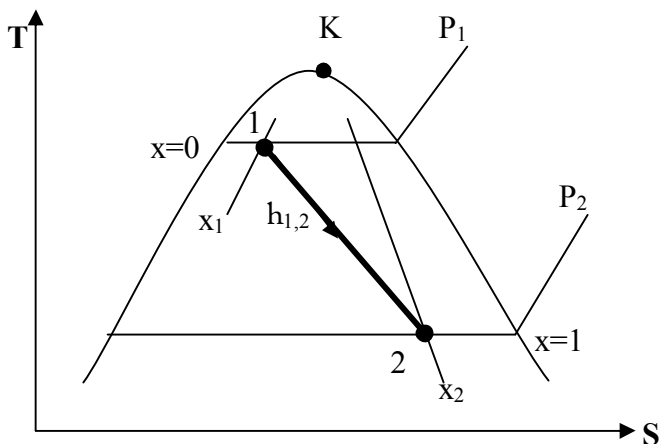


Рисунок 15б

Задано p_1 , x_1 и p_2 .

По таблице 2 по давлению p_1 определяются параметры на пограничных кривых h_1'' , h_1' , s_1'' , s_1' , v_1'' , v_1' .

Зная x_1 можно найти параметры в точке 1

$$h_1 = h_1''x_1 + h_1'(1 - x_1)$$

$$v_1 = v_1''x_1 + v_1'(1 - x_1)$$

$$s_1 = s_1''x_1 + s_1'(1 - x_1)$$

По таблице 2 по p_2 определяются h_2'' , h_2' , s_2'' , s_2' , v_2'' , v_2' .

Поскольку

$$h_2 = h_1 = h_2''x_2 + h_2'(1 - x_2)$$

можно найти степень сухости во второй точке

$$x_2 = \frac{h_2 - h_2'}{h_2'' - h_2'}$$

Далее определяются

$$s_2 = s_2''x_2 + s_2'(1 - x_2)$$

$$v_2 = v_2''x_2 + v_2'(1 - x_2)$$

Для адиабатного дросселирования $dq=0$.

Работа процесса

$$l = u_1 - u_2 = (h_1 - p_1 v_1) - (h_2 - p_2 v_2) = p_2 v_2 - p_1 v_1.$$

II. Процесс начинается в области влажного пара и заканчивается в области перегретого

Задано p_1 , x_1 и p_2 .

По таблице 2 по давлению p_1 определяются параметры на пограничных кривых h_1'' , h_1' , s_1'' , s_1' , v_1'' , v_1' .

Зная x_1 , определяются параметры в точке 1

$$h_1 = h_1'' x_1 + h_1' (1 - x_1)$$

$$v_1 = v_1'' x_1 + v_1' (1 - x_1)$$

$$s_1 = s_1'' x_1 + s_1' (1 - x_1)$$

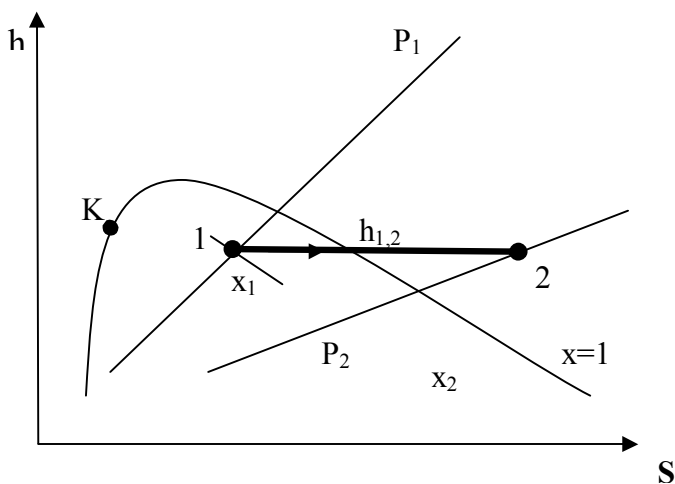


Рисунок 16а

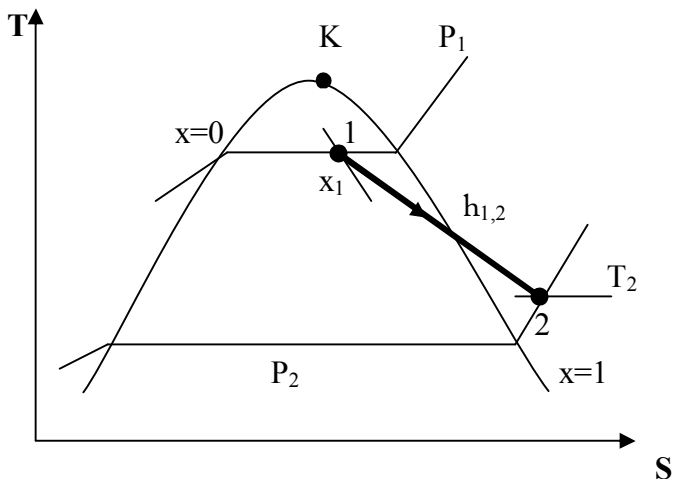


Рисунок 16б

По таблице 3 по давлению p_2 и $h_2 = h_1$ определяются параметры t_2 , s_2 , v_2 .

Дальнейший расчет ведется по вышеприведенным формулам.

III. Процесс начинается и заканчивается в области перегретого пара

Задано p_1 , T_1 и p_2 .

По таблице 3 по давлению p_1 и температуре t_1 определяют h_1 , s_1 , v_1 .

По таблице 3 по давлению p_1 энтальпии $h_2 = h_1$ определяют, s_2 , v_2 , t_2 .

Дальнейший расчет ведется по вышеприведенным формулам.

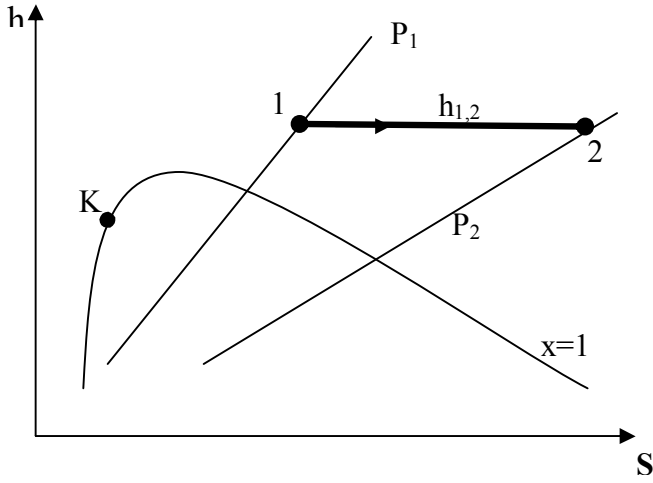


Рисунок 17а

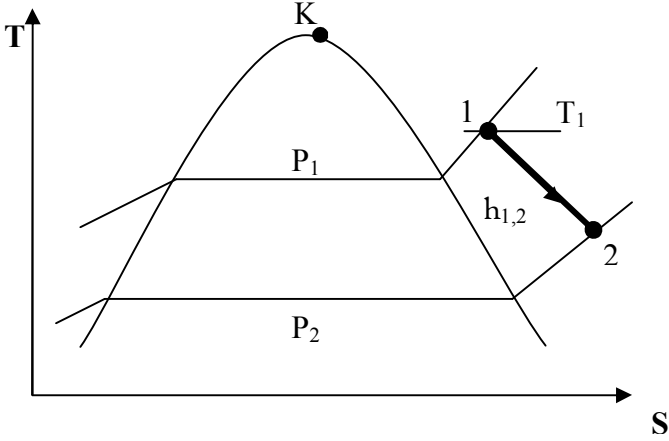


Рисунок 17б

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Вариант 1

Кипящая вода при давлении 0.17 МПа дросселируется до давления 0.1 МПа, затем к образовавшемуся в результате дросселирования пару подводится теплота при $t = \text{const}$, пока пар не достигнет давления 0.008 МПа, затем этот пар адиабатно расширяется и приобретает степень сухости 0.99. Рассчитать процессы. Изобразить в h,s - и T,s - диаграммах.

Вариант 2

Сухой насыщенный пар при давлении 0.02 МПа адиабатно сжимается, приобретая температуру 400°C , затем этот пар дросселируется до давления 0.1 МПа, а потом от него отводится теплота при $v = \text{const}$ и пар приобретает давление $p = 0.015$ МПа. Рассчитать процессы. Изобразить в h,s - и T,s - диаграммах.

Вариант 3

Пар с параметрами $t = 150^\circ \text{C}$ и $x = 0.2$ нагревается в закрытом сосуде, становясь сухим насыщенным, затем он адиабатно расширяется до давления 0.008 МПа, а потом изотермически расширяется до давления 0.002 МПа. Рассчитать процессы. Изобразить в h,s - и T,s - диаграммах.

Вариант 4

Пар с параметрами 1.5 МПа и 500°C адиабатно расширяется, становясь сухим насыщенным, затем изотермически сжимается, достигая степени сухости 0.5. а далее дросселируется до давления 0.02 МПа. Рассчитать процессы. Изобразить в h,s - и T,s - диаграммах.

Вариант 5

Сухой насыщенный пар при температуре 140°C нагревается в закрытом сосуде до 450°C , потом адиабатно расширяется, вновь становясь сухим насыщенным, а затем изотермически сжимается, приобретая степень сухости 0.2. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** -и **T,s**- диаграммах.

Вариант 6

Пар с давлением 0.5 МПа и степенью сухости 0.3 дросселируется до давления 0.3 МПа, затем изотермически расширяется, становясь сухим насыщенным, а потом адиабатно сжимается до температуры 400°C . Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** -и **T,s**- диаграммах.

Вариант 7

Пар с параметрами 3 МПа и 350°C адиабатно расширяется до давления 0.01 МПа, затем изотермически сжимается до степени сухости 0.5, а потом дросселируется до давления 0.005 МПа. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** -и **T,s**- диаграммах.

Вариант 8

Пар с параметрами 9 МПа и 540°C дросселируется до давления 5 МПа, далее адиабатно расширяется до давления 0.01 МПа, а затем от него отводится теплота в закрытом сосуде до достижения давления 0.008 МПа. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** -и **T,s**- диаграммах.

Вариант 9

Пар давлением 0.05 МПа и степенью сухости $x=0.4$ изохорно нагревается до температуры 200°C , далее он дросселируется до 0.01 МПа и адиабатно сжимается до температуры 550°C . Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** -и **T,s**- диаграммах.

Вариант 10

Пар с параметрами 0.2 МПа и 200 °С изотермически сжимается до состояния сухого насыщенного, затем адиабатно расширяется до температуры 150 °С и далее охлаждается при постоянном давлении до степени сухости 0.4. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s**- и **T,s**- диаграммах.

Вариант 11

Сухой насыщенный пар при температуре 250 °С адиабатно сжимается до давления 10 МПа, затем изотермически расширяется до давления 0.2 МПа, а потом от него отводится теплота при постоянном давлении, и пар приобретает степень сухости 0.4. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s**- и **T,s**- диаграммах.

Вариант 12

Сухой насыщенный пар при температуре 300 °С дросселируется до температуры 250 °С, затем изотермически сжимается до $x = 0.3$, а потом к нему подводится теплота при постоянном давлении и пар приобретает температуру 400 °С. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s**- и **T,s**- диаграммах.

Вариант 13

Кипящая вода при 180 °С изобарно нагревается до достижения степени сухости 0.5. затем дросселируется до температуры 140 °С, а потом адиабатно сжимается и приобретает температуру 550 °С. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s**- и **T,s**- диаграммах.

Вариант 14

Водяной пар с параметрами 2 МПа и $x = 0.5$ изохорно нагревается до температуры 450 °С, далее дросселируется до давления 1.5 МПа, а потом адиабатно расширяется и становится сухим насыщенным. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s**- и **T,s**- диаграммах.

Вариант 15

Пар с параметрами 0.2 МПа и 550 °С изотермически сжимается до давления 10 МПа, потом от него отводится теплота при постоянном давлении до степени сухости 0.6, а далее адиабатно сжимается и становится сухим насыщенным. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** - и **T,s**- диаграммах.

Вариант 16

Пар с температурой 190 °С и степенью сухости 0.5 изобарно нагревается до достижения состояния сухого насыщенного, потом адиабатно сжимается до давления 2 МПа, а затем изотермически сжимается и приобретает степень сухости 0.4. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** - и **T,s**- диаграммах.

Вариант 17

Кипящая вода при давлении 1.3МПа изотермически расширяется до $x = 0.3$, затем адиабатно расширяется до давления 0.55 МПа, а потом нагревается при постоянном давлении до температуры 400 °С .Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** -и **T,s**- диаграммах.

Вариант 18

Сухой насыщенный пар при температуре 50 °С адиабатно сжимается до давления 0.1 МПа, затем изотермически сжимается до состояния сухого насыщенного , а потом изобарно охлаждается до $x = 0.2$. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** -и **T,s**- диаграммах.

Вариант 19

Пар с параметрами 0.5 МПа и 200 °С адиабатно сжимается до давления 2 МПа, потом от него отводится теплота при постоянном давлении до степени сухости 0.6, затем пар дросселируется до давления 1.5 МПа. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** -и **T,s**- диаграммах.

Вариант 20

Кипящая вода при давлении 0.2 МПа дросселируется до давления 0.1 МПа, затем к образовавшемуся в результате дросселирования пару подводится теплота при $t = \text{const}$, пока пар не достигнет давления 0.006 МПа, затем этот пар адиабатно расширяется и приобретает степень сухости 0.92. Рассчитать процессы. Изобразить в h,s - и T,s - диаграммах.

Вариант 21

Пар с параметрами 0.5 МПа и 250°C адиабатно сжимается до давления 2 МПа, потом от него отводится теплота при постоянном давлении до степени сухости 0.4, затем пар дросселируется до давления 1.2 МПа. Рассчитать процессы. Изобразить в h,s - и T,s - диаграммах.

Вариант 22

Кипящая вода при давлении 1.6 МПа изотермически расширяется до $x = 0.4$, затем адиабатно расширяется до давления 0.5 МПа, а потом нагревается при постоянном давлении до температуры 360°C . Рассчитать процессы. Изобразить в h,s - и T,s - диаграммах.

Вариант 23

Пар давлением 0.03 МПа и степенью сухости $x = 0.6$ изохорно нагревается до температуры 220°C , далее он дросселируется до 0.012 МПа и адиабатно сжимается до температуры 500°C . Рассчитать процессы. Изобразить в h,s - и T,s - диаграммах.

Вариант 24

Пар с параметрами 2 МПа и 540°C адиабатно расширяется, становясь сухим насыщенным, затем изотермически сжимается, достигая степени сухости 0.3. а далее дросселируется до давления

0.01 МПа. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** -и **T,s**- диаграммах.

Вариант 25

Пар с параметрами $t = 180^\circ \text{C}$ и $x = 0.3$ нагревается в закрытом сосуде, становясь сухим насыщенным, затем он адиабатно расширяется до давления 0.006 МПа, а потом изотермически расширяется до давления 0.001 МПа. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** -и **T,s**- диаграммах.

Вариант 26

Пар с параметрами 2.5 МПа и 350°C адиабатно расширяется, становясь сухим насыщенным, затем изотермически сжимается, достигая степени сухости 0.3, а далее дросселируется до давления 0.03 МПа. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** -и **T,s**- диаграммах.

Вариант 27

Сухой насыщенный пар при температуре 180°C нагревается в закрытом сосуде до 550°C , потом адиабатно расширяется, вновь становясь сухим насыщенным, а затем изотермически сжимается, приобретая степень сухости 0.4. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** -и **T,s**- диаграммах.

Вариант 28

Пар с давлением 0.4 МПа и степенью сухости 0.2 дросселируется до давления 0.2 МПа, затем изотермически расширяется, становясь сухим насыщенным, а потом адиабатно сжимается до температуры 300°C . Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** -и **T,s**- диаграммах.

Вариант 29

Пар с параметрами 10 МПа и 500 °С дросселируется до давления 6 МПа, далее адиабатно расширяется до давления 0.02 МПа, а затем от него отводится теплота в закрытом сосуде до достижения давления 0.005 МПа. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** - и **T,s**- диаграммах.

Вариант 30

Пар давлением 0.06 МПа и степенью сухости $x=0.3$ изохорно нагревается до температуры 240 °С, далее он дросселируется до 0.02 МПа и адиабатно сжимается до температуры 520 °С. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** - и **T,s**- диаграммах.

Вариант 31

Пар с параметрами 0.4 МПа и 250 °С изотермически сжимается до состояния сухого насыщенного, затем адиабатно расширяется до температуры 120 °С и далее охлаждается при постоянном давлении до степени сухости 0.2. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** - и **T,s**- диаграммах.

Вариант 32

Кипящая вода при 150 °С изобарно нагревается до достижения степени сухости 0.6, затем дросселируется до температуры 100 °С, а потом адиабатно сжимается и приобретает температуру 450 °С. Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** - и **T,s**- диаграммах.

Пример

Сухой насыщенный пар при температуре 140°С нагревается в закрытом сосуде до 450 °С, потом адиабатно расширяется, вновь

становясь сухим насыщенным, а затем изотермически сжимается, приобретая степень сухости 0.2. Рассчитать процессы. Изобразить в h,s - и T,s - диаграммах.

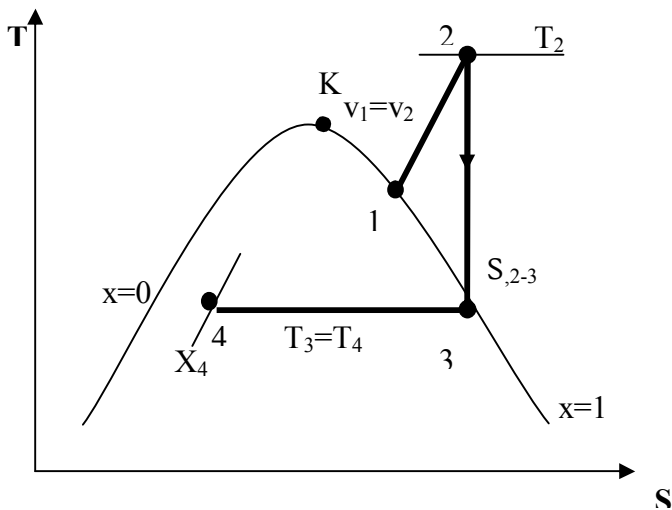
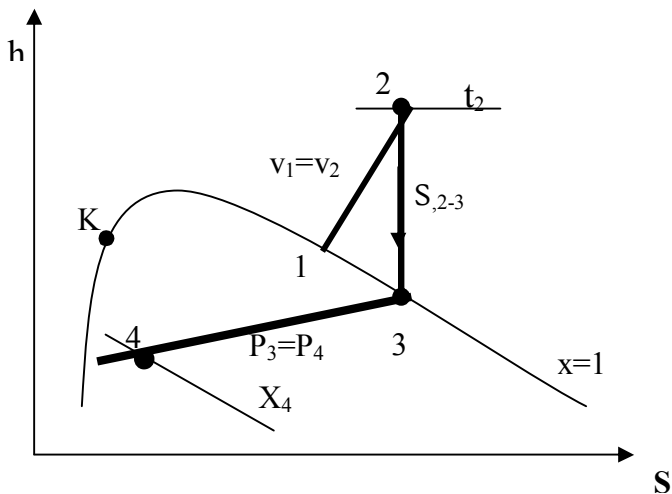


Рисунок 18

$$t_1 = 140^0 C$$

$$p_1 = 3,6136 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$x_1 = 1$$

По таблице 1

$$v_1 = v'' = 0,50875 \text{ м}^3 / \text{кг},$$

$$h_1 = h'' = 2734,0 \text{ кДж} / \text{кг},$$

$$s_1 = s'' = 6,9307 \text{ кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}.$$

Процесс 1-2 – изохорный. По удельному объему

$v_1 = v_2$ и температуре $t_2 = 450^0 C$ по таблице 3 определяется

$$p_2 = 650 \text{ кПа},$$

$$h_2 = 3375,2 \text{ кДж} / \text{кг},$$

$$s_2 = 7,8222 \text{ кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$$

В процессе 1-2

Работа изохорного процесса

$$l = 0$$

Подведенная теплота равна изменению внутренней энергии

$$\begin{aligned} q_{1-2} &= \Delta u_{1-2} = (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1) = \\ &= (3375,2 \cdot 10^3 - 6,50 \cdot 10^5 \cdot 0,50875) - \\ &- (2734 \cdot 10^3 - 3,6136 \cdot 10^5 \cdot 0,50875) = \\ &= 4,943 \cdot 10^5 \text{ Дж} / \text{кг} = 494,3 \text{ кДж} / \text{кг} \end{aligned}$$

Процесс 2-3 – адиабатный, $s_2 = s_3 = 7,8222 \text{ кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$.

Точка 3 лежит на линии $x=1$. Следовательно, по таблице 1 определяется значение энтропии сухого насыщенного пара

$$t_3 = 65^0 C,$$

$$h_3 = h'' = 2618,2 \text{ кДж / кг},$$

$$v_3 = v'' = 6,2042 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Теплота в адиабатном процессе равна нулю. $q_{2-3} = 0$

Работа расширения адиабатного процесса равна изменению внутренней энергии с противоположным знаком.

$$\begin{aligned} l_{2-3} &= -\Delta u_{2-3} = u_2 - u_3 = (h_2 - p_2 v_2) - (h_3 - p_3 v_3) = \\ &= (3375,2 \cdot 10^3 - 6,50 \cdot 10^5 \cdot 0,50875) - \\ &= -(2618,2 \cdot 10^3 - 2,5008 \cdot 10^4 \cdot 6,2042) = \\ &= 28,893 \cdot 10^5 \text{ Дж / кг} = 2889,3 \text{ кДж / кг} \end{aligned}$$

По температуре $t_3 = 65^0 C$ по таблице 1 определяются параметры на пограничных кривых

$$v' = 0,0010199 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

$$h' = 272,02 \text{ кДж / кг}$$

$$s' = 0,8933, \text{ кДж / кгК}$$

$$v'' = 6,2042 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

$$h'' = 2618,2 \text{ кДж / кг}$$

$$s'' = 7,832 \text{ кДж / кгК}$$

$$p = 2,5008 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

Параметры в точке 4

$$v_4 = v''x_4 + v'(1-x_4) = 6,2042 \cdot 0,2 + 0,0010199(1-0,2) = \\ = 1,2417 \text{ м}^3 / \text{кг},$$

$$h_4 = h''x_4 + h'(1-x_4) = 2618,2 \cdot 0,2 + \\ + 272,02(1-0,2) = 741,25 \text{ кДж / кг}$$

$$s_4 = s''x_4 + s'(1-x_4) = 7,832 \cdot 0,2 + \\ + 0,8933(1-0,2) = 0,875 \text{ кДж / кг} \cdot K$$

В изотермическом процессе теплота

$$q_{3-4} = T_3(s_4 - s_3) = (65 + 273)(0,875 - 7,8222) = -2348 \text{ кДж / кг}$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u_{3-4} = u_4 - u_3 = (h_4 - p_4 v_4) - (h_3 - p_3 v_3) = \\ = (741,25 \cdot 10^3 - 2,5008 \cdot 10^4 \cdot 1,2417) - \\ - (2618,2 \cdot 10^3 - 2,5008 \cdot 10^4 \cdot 6,2042) = \\ = -17,5285 \cdot 10^5 \text{ Дж / кг} = -1752,85 \text{ кДж / кг}$$

Работа процесса 3-4

$$l_{3-4} = q_{3-4} - \Delta u_{3-4} = -2348 - (-1752,85) = -595,15 \text{ кДж / кг}$$

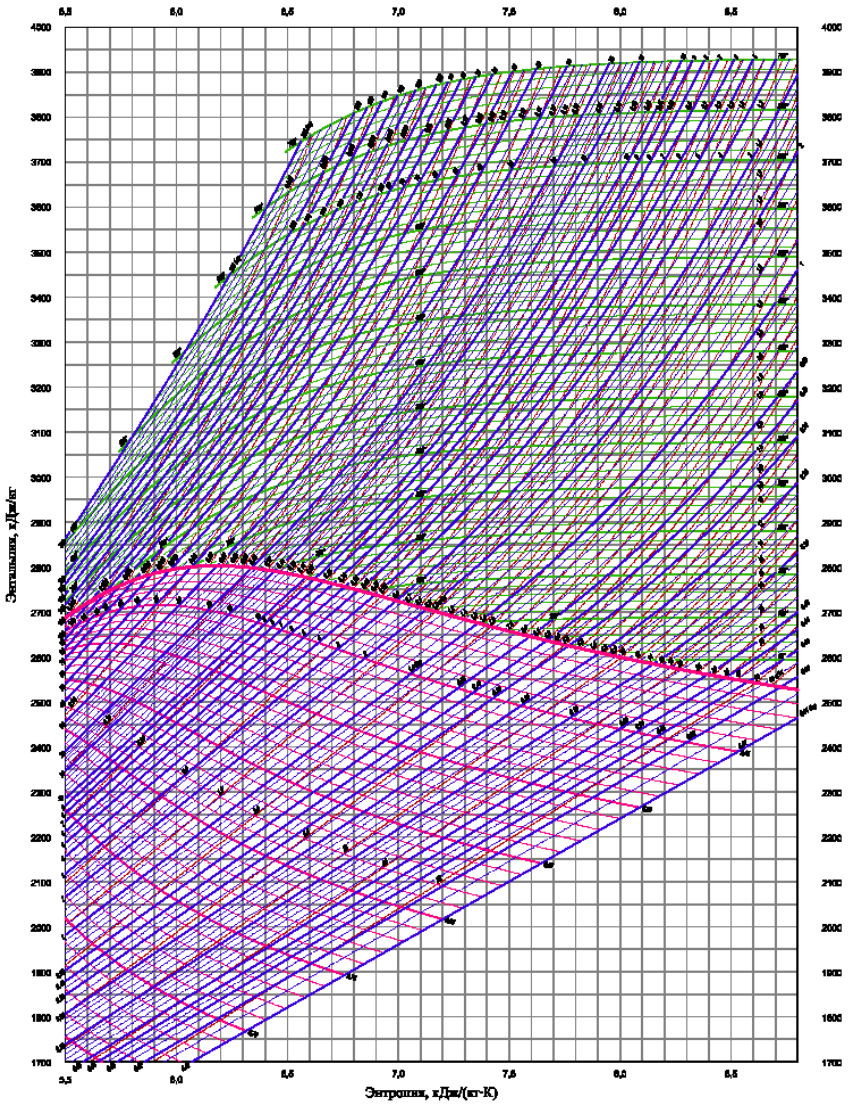


Рисунок 19 - h,s – диаграмма водяного пара

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллин В.А. Техническая термодинамика/ В.А. Кириллин, В.В Сычев, А.Е. Шейндлин -4-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 416 с.
2. Техническая термодинамика: учебник для вузов/ Крутов В.И. [и др.], под общ. ред. В.И. Крутова.- 3-е изд.- М.: Высш. шк., 1991.-384 с.
3. Вукалович М.П. Термодинамика: учебное пособие/ М.П. Вукалович, И.И. Новиков.- М.: Машиностроение, 1972.-672 с.
4. Андриющенко А.И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок: учебное пособие/ А.И. Андриющенко -3-е изд.- М.: Высшая школа, 1985.- 319 с.
5. Сборник задач по технической термодинамике: учебное пособие/Андрианова Т.Н. [и др.]; под общ. Ред. Т.Н. Андриановой-3-е изд. - М.: Энергоиздат, 1981. - 240 с.
6. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике / О.М. Рабинович - М.: Машиностроение, 1973.- 344 с.
7. Зубарев В.Н. Практикум по технической термодинамике: учебное пособие/ В.Н.Зубарев, А.А. Александров, В.С.Охотин - 3-е изд., перераб.- М.: Энергоатомиздат, 1986.- 304 с.
9. Ривкин С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара: Справочник/ С.Л.Ривкин, А.А. Александров - М.: Энергоатомиздат, 1980.- 424 с.
12. Кудимов В.А. Техническая термодинамика/ В.А.Кудимов, Э.М. Карташев– М.: Высшая школа, 2000.
13. Исаев С.И. Термодинамика: учеб. для ВУЗов/ С.И.Исаев- 3-е изд.– М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.- 416с.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИН...	3
Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара.....	4
Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температурам).....	4
Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температурам).....	4
Термодинамические свойства воды и перегретого пара.....	4
Расчет изобарного процесса $p = const$.....	6
Расчет изотермического процесса $T = const$.....	12
Расчет изохорного процесса $V = const$.....	17
Расчет адиабатного процесса $dq=0$.....	21
Расчет процесса адиабатного дросселирования $h = const$.....	26
ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.....	31
Пример	37
h,s – диаграмма водяного пара	42

Учебное издание

ХУТСКАЯ Наталия Геннадьевна
ПАЛЬЧЁНОК Геннадий Иванович

РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ВОДЯНОМ ПАРЕ

Методическое пособие
по дисциплине «Термодинамика» для студентов
специальности 1–43 01 06 «Энергоэффективные технологии
и энергетический менеджмент»

Подписано в печать
Формат 60x84 1/16. Бумага

Усл. печ. л.2,61. Уч. -изд. л.2,04. Тираж 100. Заказ.
Белорусский национальный технический университет
ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.
Проспект Независимости, 65.220013, Минск.
Отпечатано