

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.

$v$ , м<sup>3</sup>/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

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

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

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

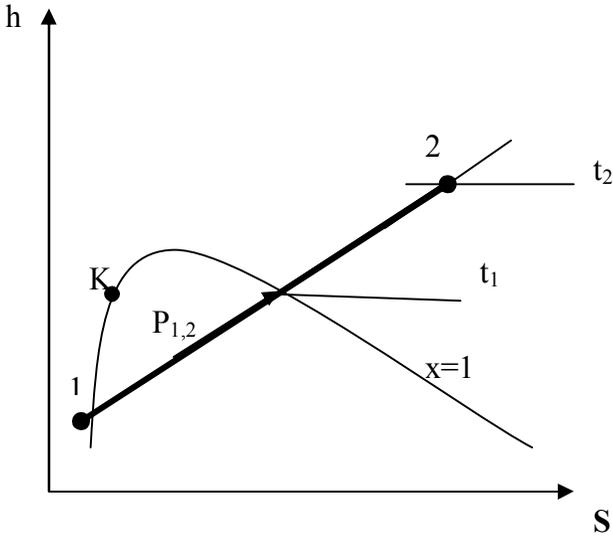


Рисунок 1а

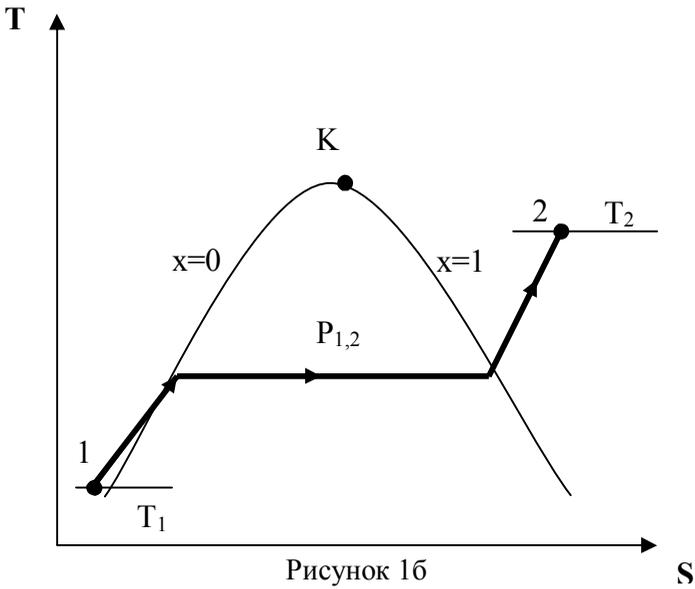
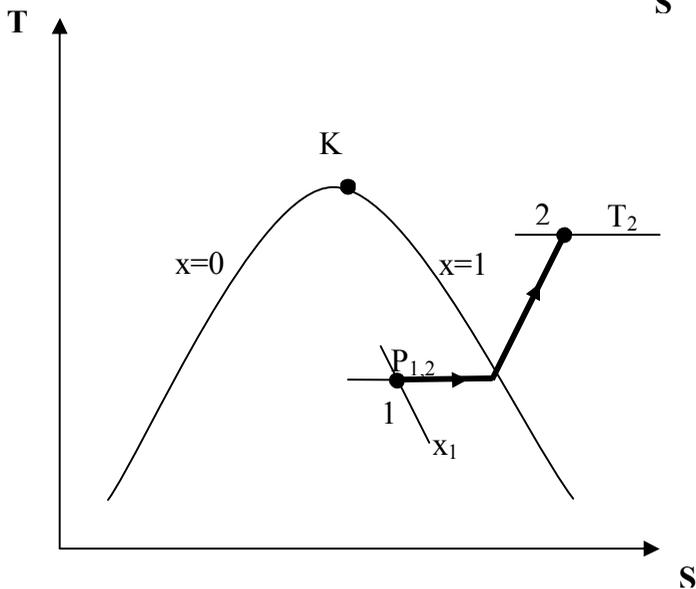
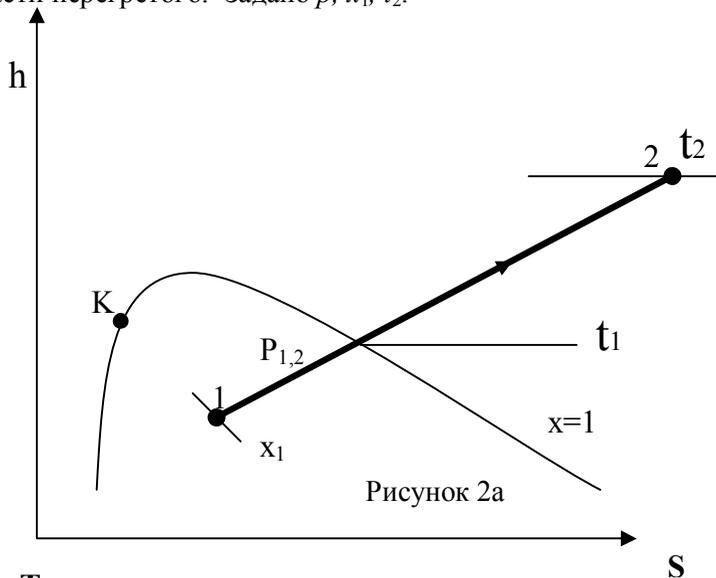


Рисунок 1б

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



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:  $p, x_1, x_2$ .

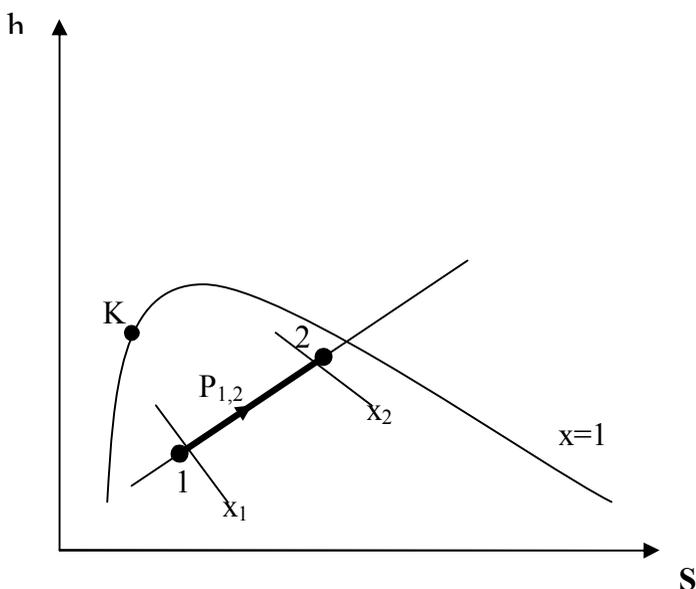


Рисунок 3а

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

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

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

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

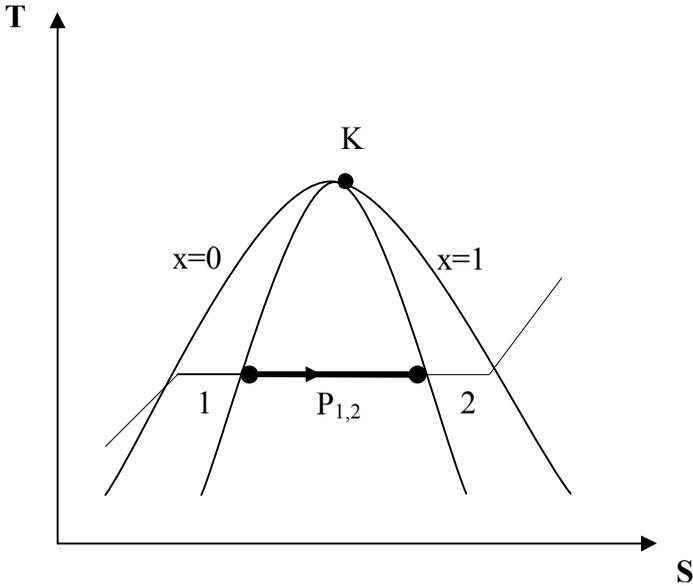


Рисунок 3б

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.

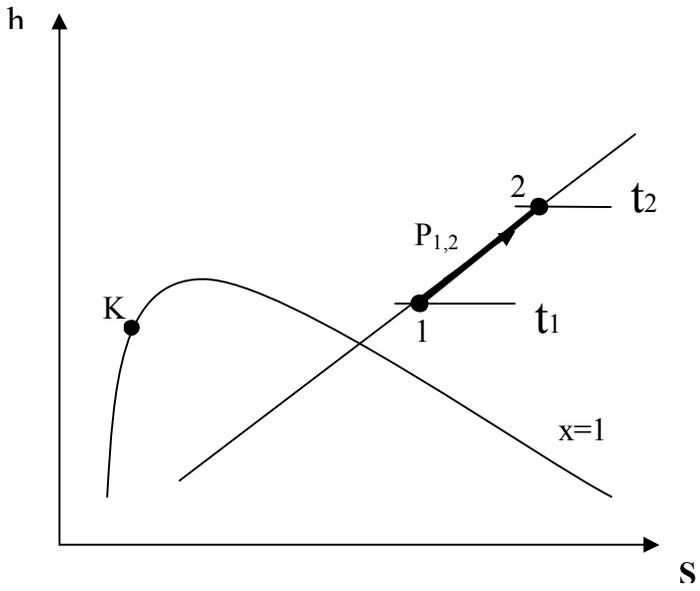


Рисунок 4а

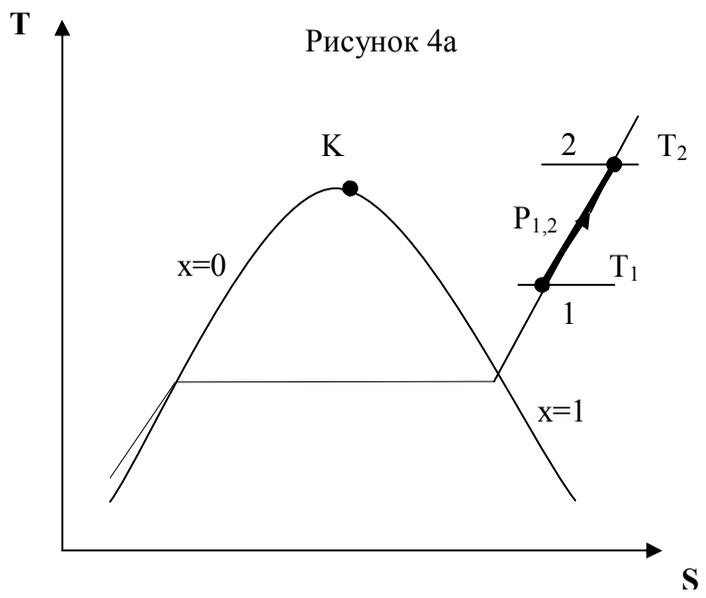
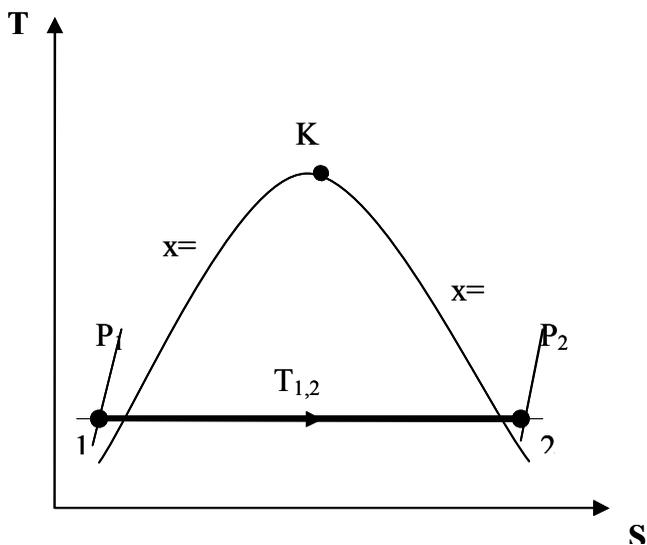
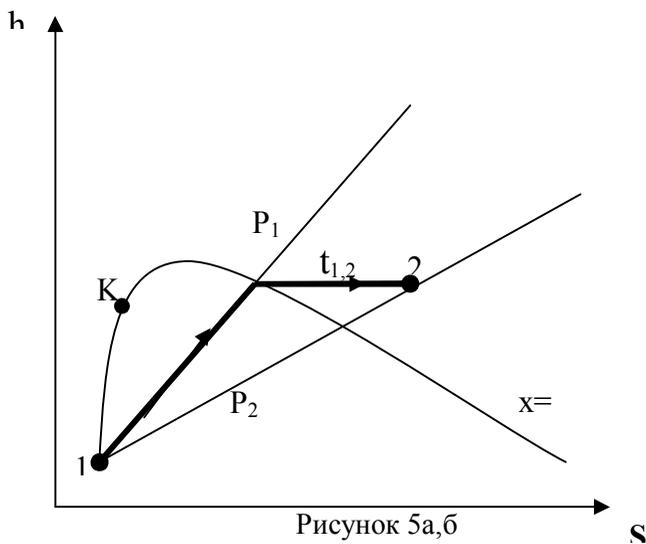


Рисунок 4б

## Расчет изотермического процесса $T = const$

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



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:  $T, x_1, x_2$ .

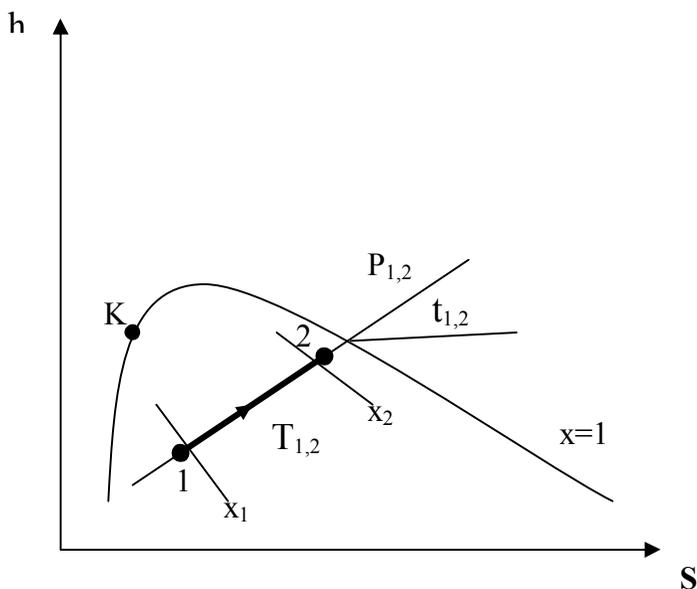


Рисунок 6а

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

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

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

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

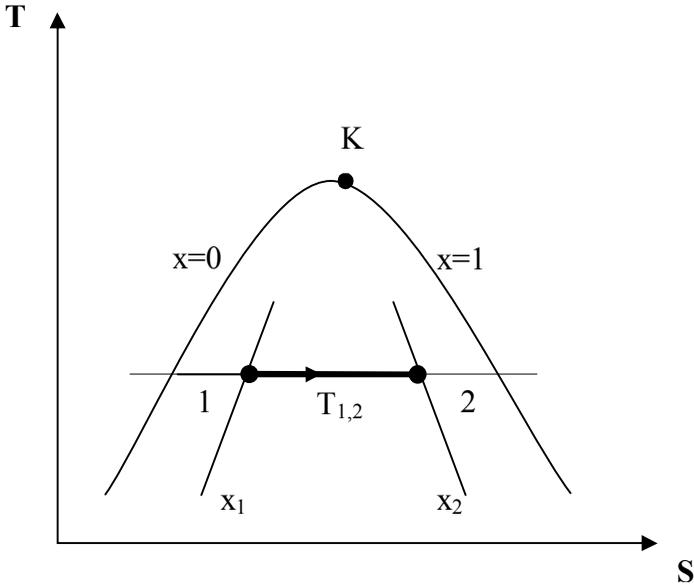


Рисунок 6б

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  $v', v'', h', h'', s', s''$ .

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

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

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

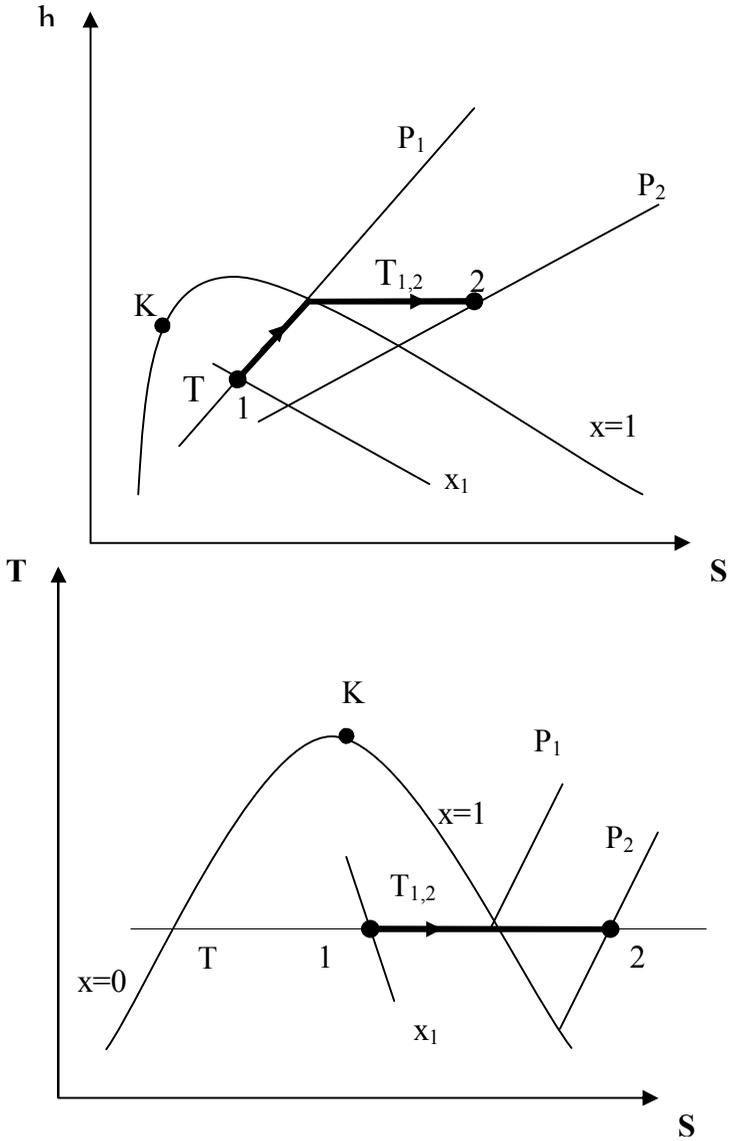


Рисунок 7 а,б

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  $T, p_1, p_2$ .

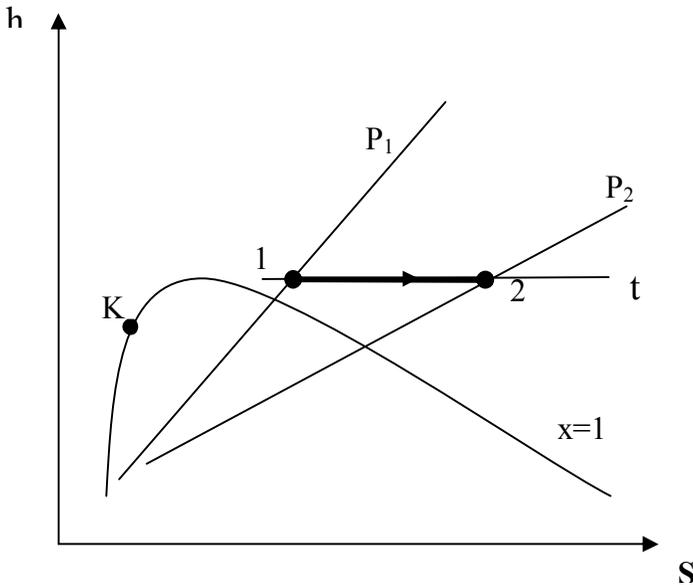


Рисунок 8а

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.

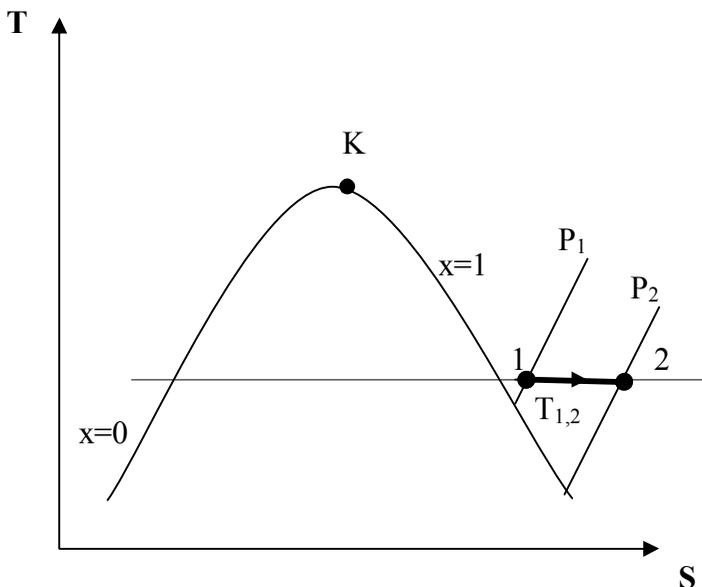


Рисунок 8б

### 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

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

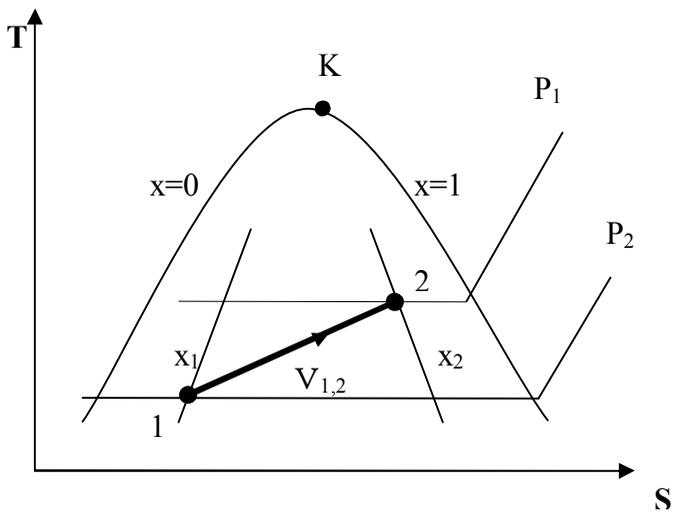
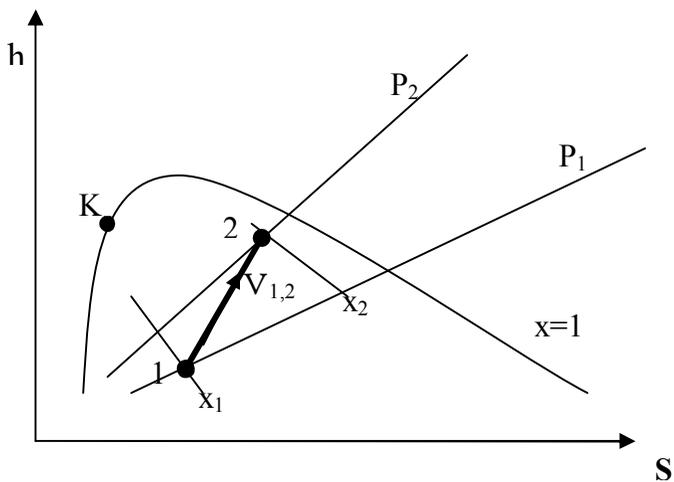


Рисунок 9а,б

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

$$q = u_2 - u_1 = (h_2 - p_2v_2) - (h_1 - p_1v_1).$$

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

Задано  $p_1, x_1, p_2$  (или  $t_2$ ).

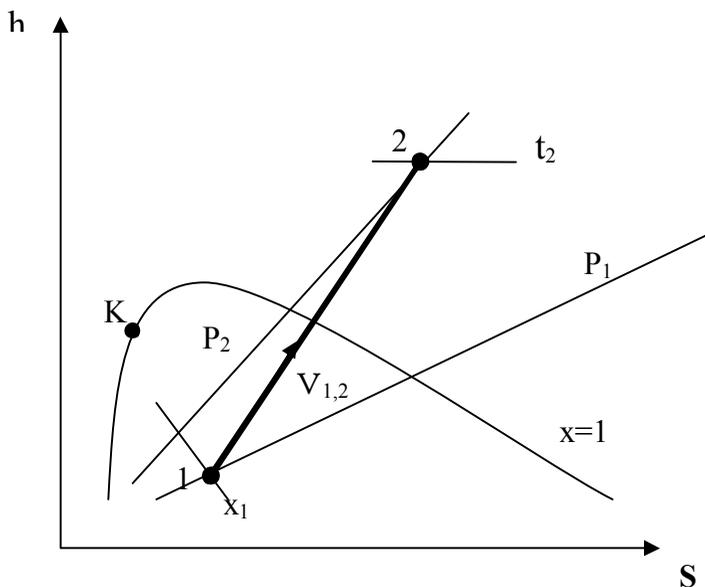


Рисунок 10а

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

Проводится расчет параметров в точке 1.



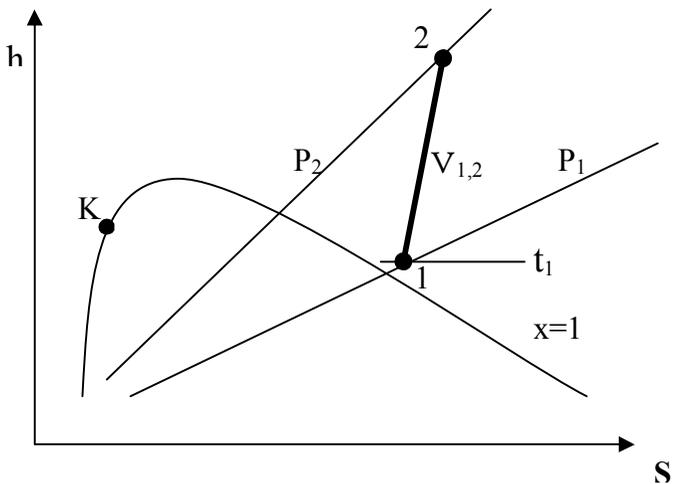


Рисунок 11а

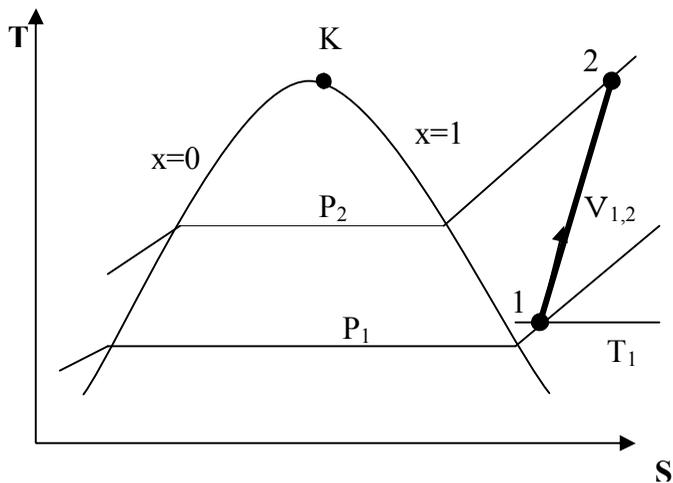


Рисунок 11б

**Расчет адиабатного процесса  $dq=0$**

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

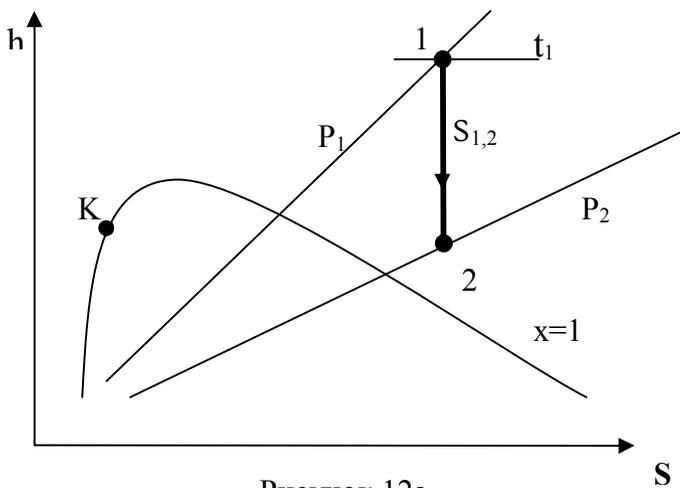


Рисунок 12а

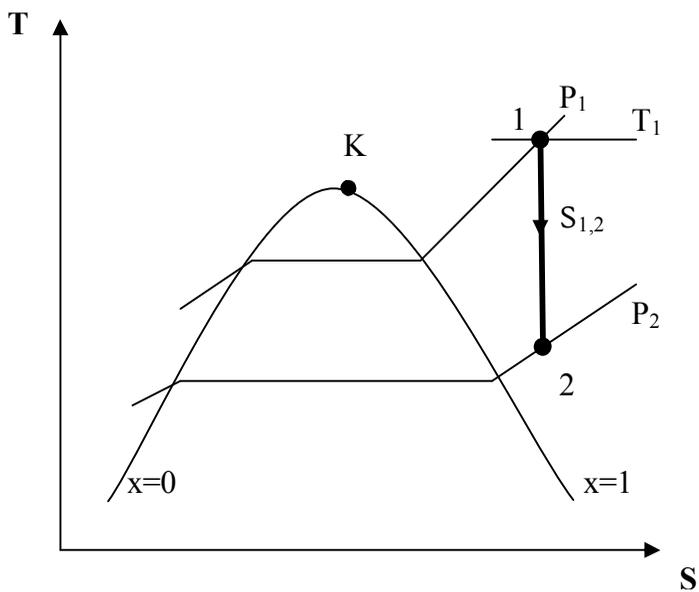


Рисунок 12б

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  $p_2$ .

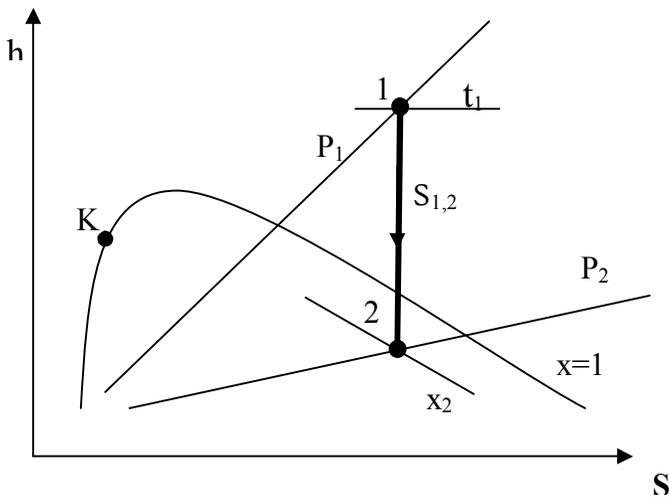


Рисунок 13а

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

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

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

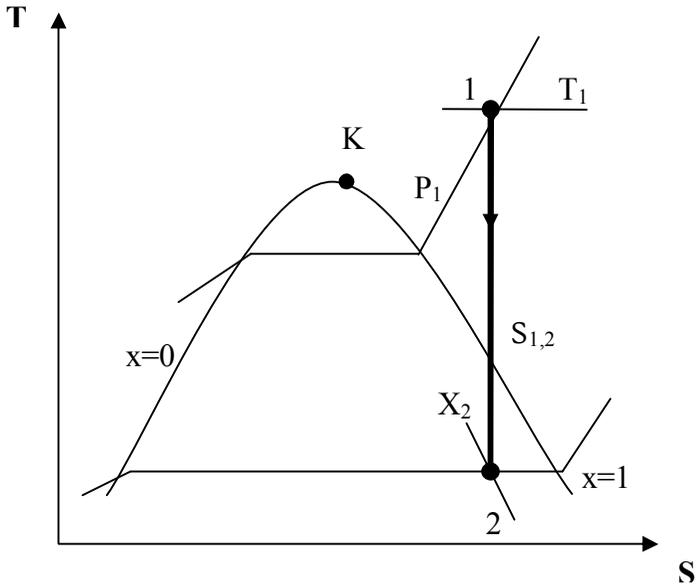


Рисунок 136

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  $h_2''$ ,  $h_2'$ ,  $s_1''$ ,  $s_2'$ ,  $v_2''$ ,  $v_2'$ .

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

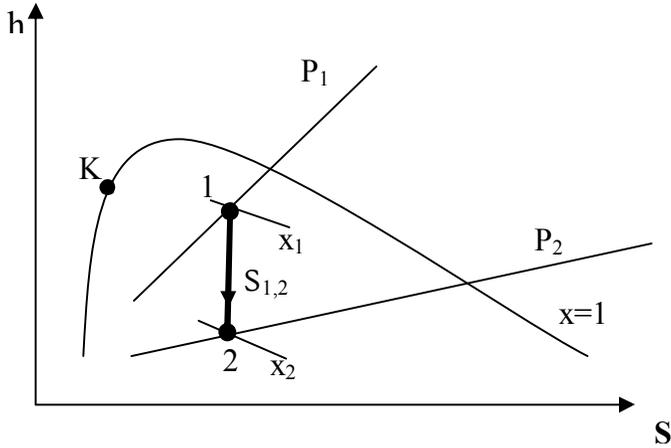


Рисунок 14а

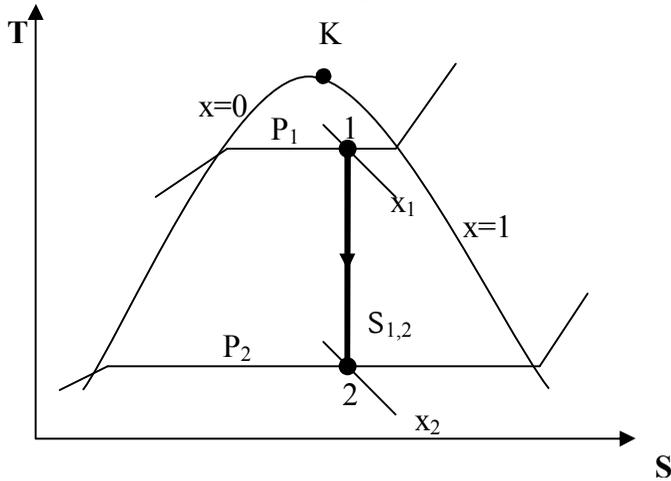


Рисунок 14б

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

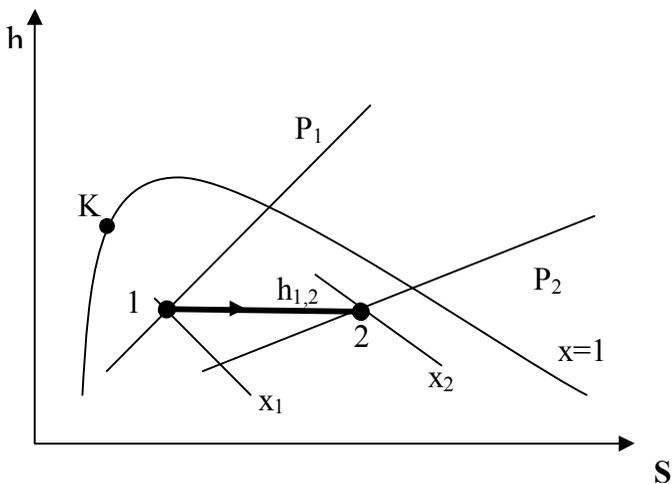


Рисунок 15а

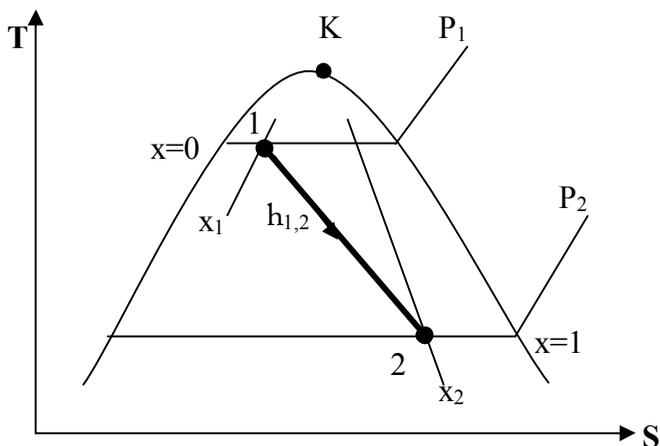


Рисунок 15б

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

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

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

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

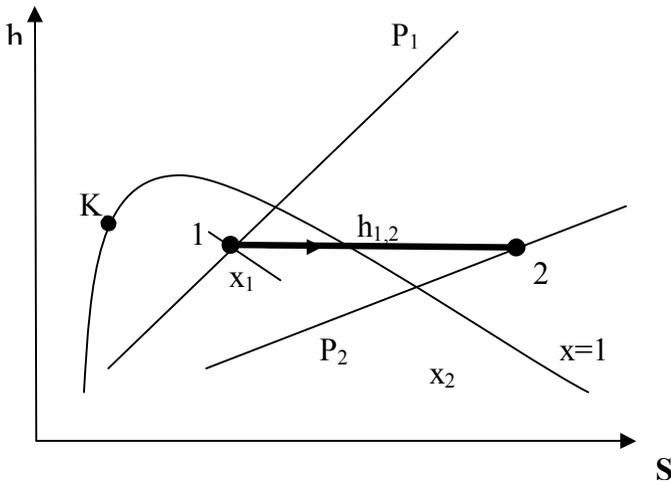


Рисунок 16а

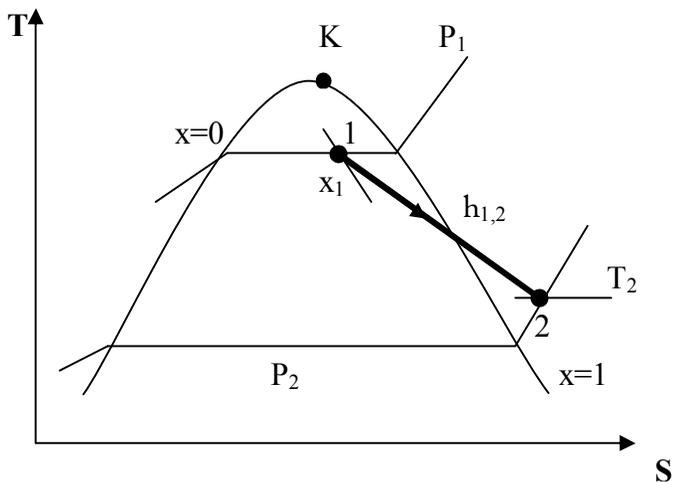


Рисунок 16б

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.

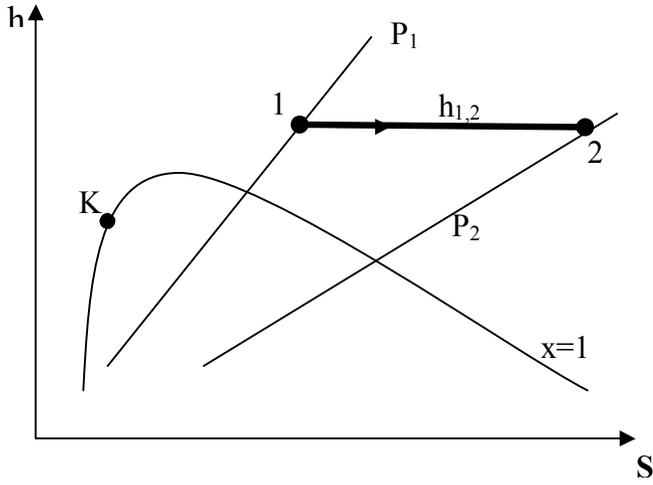


Рисунок 17а

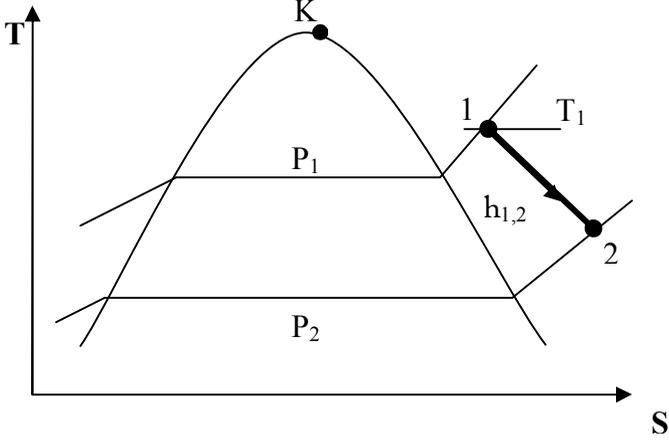


Рисунок 17б

## 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° С, 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 ° С 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  $140^{\circ}\text{C}$  нагревается в закрытом сосуде до  $450^{\circ}\text{C}$ , 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  $400^{\circ}\text{C}$ . Рассчитать процессы. Изобразить в **h,s** -и **T,s**- диаграммах.

### Вариант 7

Пар с параметрами 3 МПа и  $350^{\circ}\text{C}$  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  $540^{\circ}\text{C}$  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  $200^{\circ}\text{C}$ , далее он дросселируется до 0.01 МПа и адиабатно сжимается до температуры  $550^{\circ}\text{C}$ . 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  $250^\circ\text{C}$  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  $360^\circ\text{C}$ . 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  $220^\circ\text{C}$ , далее он дросселируется до 0.012 МПа и адиабатно сжимается до температуры  $500^\circ\text{C}$ . Рассчитать процессы. Изобразить в  $h,s$ - и  $T,s$ - диаграммах.

### Вариант 24

Пар с параметрами 2 МПа и  $540^\circ\text{C}$  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  $350^\circ \text{C}$  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  $180^\circ \text{C}$  нагревается в закрытом сосуде до  $550^\circ \text{C}$ , 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  $300^\circ \text{C}$ . 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.

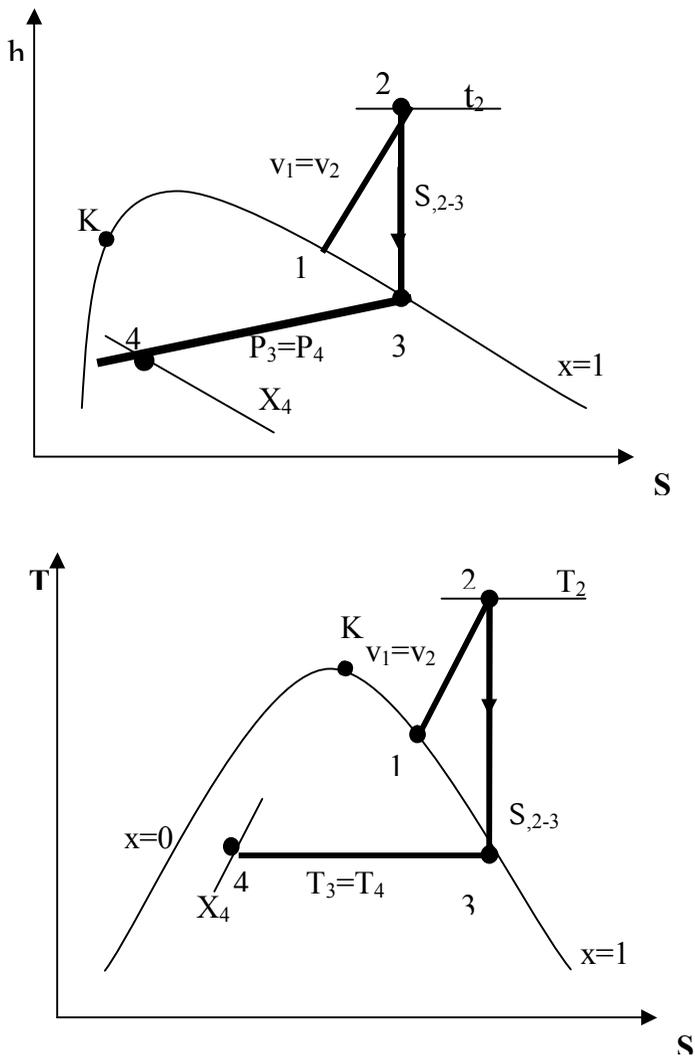


Рисунок 18

$$t_1 = 140^0 C$$

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

$$x_1 = 1$$

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

$$v_4 = v''x_4 + v'(1-x_4) = 6,2042 \cdot 0,2 + 0,0010199(1-0,2) =$$

$$= 1,2417 \text{ м}^3 / \text{кг},$$

$$h_4 = h''x_4 + h'(1-x_4) = 2618,2 \cdot 0,2 +$$

$$+ 272,02(1-0,2) = 741,25 \text{ кДж} / \text{кг}$$

$$s_4 = s''x_4 + s'(1-x_4) = 7,832 \cdot 0,2 +$$

$$+ 0,8933(1-0,2) = 0,875 \text{ кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$$

В изотермическом процессе теплота

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

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u_{3-4} = u_4 - u_3 = (h_4 - p_4 v_4) - (h_3 - p_3 v_3) =$$

$$= (741,25 \cdot 10^3 - 2,5008 \cdot 10^4 \cdot 1,2417) -$$

$$- (2618,2 \cdot 10^3 - 2,5008 \cdot 10^4 \cdot 6,2042) =$$

$$= -17,5285 \cdot 10^5 \text{ Дж} / \text{кг} = -1752,85 \text{ кДж} / \text{кг}$$

Работа процесса 3-4

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

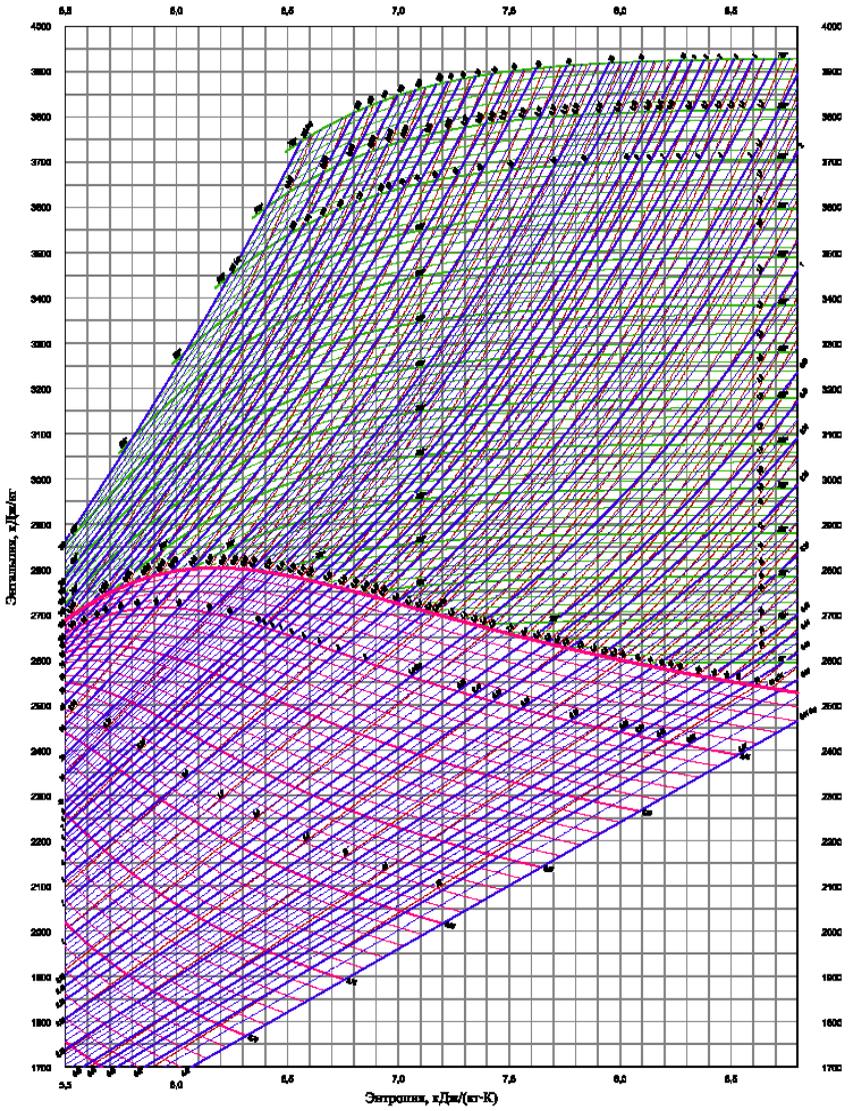


Рисунок 19 -  $h,s$  – диаграмма водяного пара

## 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

<b>ОБОЗНАЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИН...</b>	<b>3</b>
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
<b>Расчет изобарного процесса <math>p = const</math>.....</b>	<b>6</b>
<b>Расчет изотермического процесса <math>T = const</math>.....</b>	<b>12</b>
<b>Расчет изохорного процесса <math>V = const</math>.....</b>	<b>17</b>
<b>Расчет адиабатного процесса <math>dq=0</math>.....</b>	<b>21</b>
<b>Расчет процесса адиабатного дросселирования <math>h = const</math>.....</b>	<b>26</b>
<b>ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.....</b>	<b>31</b>
<b>Пример</b>	<b>37</b>
<b>h,s – диаграмма водяного пара</b>	<b>42</b>

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