

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»

Кафедра теоретических основ теплотехники

## **ПОСТРОЕНИЕ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА**

Методические указания по курсу «Техническая термодинамика» для  
студентов по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и  
теплотехника» и 14.05.02 «Атомные станции:  
проектирование, эксплуатация и инжиниринг»

**Иваново 2021**

Составители    Д.В. РАКУТИНА  
                          А.В. ПЕКУНОВА

Редактор        И.М. ЧУХИН

Методические указания содержат алгоритмы построения фазовых диаграмм воды и водяного пара в  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - координатах. Подробно разобрано построение пограничных кривых, изобар, изохор, изотерм и адиабат по таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара. Приведены практические рекомендации по построению фазовых диаграмм в среде Microsoft Excel и MathCad Prime.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», изучающих дисциплину «Техническая термодинамика».

Утверждены цикловой методической комиссией ТЭФ

Рецензент  
кафедра теоретических основ теплотехники ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

## ВВЕДЕНИЕ

Фазовые диаграммы воды и водяного пара используются для иллюстрации и анализа различных теплотехнических процессов и циклов. Наиболее часто используют  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - диаграммы. В данных методических указаниях представлены алгоритмы построения фазовых диаграмм с использованием таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара.

На фазовых диаграммах изображают пограничные кривые воды в состоянии насыщения ( $x = 0$ ) и сухого насыщенного пара ( $x = 1$ ). Далее в зависимости от задания строят изобару, изохору, изотерму или адиабату. При этом фиксируют изолиниями точки начала и конца процесса.

Графическое построение выполняют с соблюдением масштаба на миллиметровке или с использованием современных графических программ. В данных методических указаниях приведен порядок построения фазовых диаграмм в среде Microsoft Excel и MathCad Prime.

# 1. МЕТОДИКА ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТАБЛИЦ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА

В инженерной практике расчет процессов изменения состояния воды и водяного пара осуществляют по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара. Эти таблицы составлены на основе надежных экспериментальных данных с согласованием результатов экспериментов и расчетных величин на межгосударственных уровнях.

В нашей стране утвержденным стандартом являются таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара, составленные М.П. Вукаловичем, С.Л. Ривкиным, А.А. Александровым [4, 5, 6]. Они включают в себя данные по термодинамическим свойствам воды и водяного пара в диапазоне изменения давления от 0,0061 до 1000 бар и температуры от 0 до 1000 °С. В таблицах приведены значения удельного объема  $v$ , удельной энтальпии  $h$  и удельной энтропии  $s$  для разных фазовых состояний воды и водяного пара.

Первая и вторая таблицы описывают свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения в зависимости от температуры и давления насыщения. Параметры на линии  $x = 0$  (вода в состоянии насыщения) обозначают с одним штрихом ( $v'$ ,  $h'$ ,  $s'$ ), а на линии  $x = 1$  (сухой насыщенный пар) – с двумя штрихами ( $v''$ ,  $h''$ ,  $s''$ ). Для удобства расчетов в таблицах даны величины  $r = h'' - h'$  и  $s'' - s'$ .

Параметры влажного насыщенного пара ( $0 < x < 1$ ) определяют по формулам

$$v_x = v' + x \cdot (v'' - v'); \quad (1.1)$$

$$h_x = h' + x \cdot r = h' + x \cdot (h'' - h'); \quad (1.2)$$

$$s_x = s' + x \cdot (s'' - s'), \quad (1.3)$$

где  $v$  – удельный объем, м<sup>3</sup>/кг;  $h$  – удельная энтальпия, кДж/кг;  $s$  – удельная энтропия, кДж/(кг·К);  $x$  – степень сухости пара;  $r$  – удельная теплота парообразования, кДж/кг.

Используя параметры влажного насыщенного пара, рассчитывают степень сухости:

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{h_x - h'}{r} = \frac{s_x - s'}{s'' - s'}. \quad (1.4)$$

Диапазон определяющих параметров табл. 1 и 2 – от тройной точки воды ( $t_0 = 0,01$  °С и  $p_0 = 611,2$  Па) до критической точки воды ( $t_{кр} = 374,12$  °С и  $p_{кр} = 22,115$  МПа).

Третья таблица описывает свойства жидкой фазы воды и перегретого водяного пара в диапазоне давления от 1 кПа до 100 МПа и температуры от 0 до 1000 °С. В качестве определяющих параметров здесь необходимы две величины – давление и температура. Для

наглядной ориентации параметры жидкой фазы и паровой отделены жирными горизонтальными линиями. Выше этих линий находится жидкая фаза воды, ниже – перегретый водяной пар. При давлениях выше критического ( $p_{кр} = 22,115$  МПа) эти разделительные линии отсутствуют, т.к. при сверхкритических параметрах нет видимого двухфазного перехода жидкости в пар.

В таблицах не приведены значения внутренней энергии, для ее расчета используют соотношение

$$u = h - p \cdot v, \quad (1.5)$$

где  $p$  – давление, кПа;  $u$  – удельная внутренняя энергия, кДж/кг.

При использовании справочных таблиц [4, 5, 6] для определения параметров воды сначала необходимо определить ее фазовое состояние.

Определение фазового состояния воды выполняется по следующему алгоритму:

1) при  $p = \text{const}$ :

$t < t_n$  – жидкая фаза воды, табл. 3;

$t > t_n$  – перегретый пар, табл. 3;

$t = t_n$  – необходимо знать  $h$ ,  $v$  или  $s$ ,

например, если известно  $h$ :

$h = h'$  – кипящая вода ( $x = 0$ ), табл. 1 или 2;

$h = h''$  – сухой насыщенный пар ( $x = 1$ ), табл. 1 или 2;

$h' < h < h''$  – влажный пар ( $0 < x < 1$ ), формулы (1.1) ÷ (1.3);

$h < h'$  – жидкая фаза воды, табл. 3;

$h > h''$  – перегретый пар, табл. 3.

*Аналогично можно использовать  $v$  и  $s$ .*

2) при  $t = \text{const}$ :

$p < p_n$  – перегретый пар, табл. 3;

$p > p_n$  – жидкая фаза воды, табл. 3;

$p = p_n$  – аналогично  $t = t_n$  при  $p = \text{const}$  с ориентацией на  $h$ ,  $v$ ,  $s$ .

## 2. ПОСТРОЕНИЕ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ

Построение фазовых диаграмм в  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - координатах выполняют с использованием таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара [4, 5, 6] по стандартной методике [7].

### 2.1. Построение нижней ( $x = 0$ ) и верхней ( $x = 1$ ) пограничных кривых

#### *Диаграмма $p-v$*

В интервале давлений от 1 кПа до  $p_{кр}$  по табл. 2 [4, 5, 6] определяют  $v'$  (для кривой  $x = 0$ ) и  $v''$  (для кривой  $x = 1$ ). Отмечают критическую точку К при  $p_{кр} = 22,115$  МПа и  $v_{кр} = 0,003147$  м<sup>3</sup>/кг, в которой сливаются нижняя и верхняя пограничные кривые (рис. 1).

#### *Диаграмма $T-s$*

Задают значения температур в интервале от 0 °С до  $t_{кр} = 374,12$  °С. Из табл. 1 [4, 5, 6] определяют  $s'$  (кривая  $x = 0$ ) и  $s''$  (кривая  $x = 1$ ). Отмечают критическую точку К, в которой  $s' = s'' = 4,4237$  кДж/(кг·К) (рис. 2).

#### *Диаграмма $h-s$*

Из табл. 1 или 2 [4, 5, 6] для произвольно выбранных температур (от 0 °С до  $t_{кр}$ ) или давлений (от 1 кПа до  $p_{кр}$ ) берут парные значения  $h'$  и  $s'$  для построения кривой  $x = 0$  и  $h''$  и  $s''$  – для кривой  $x = 1$ . Отмечают критическую точку К при  $h_{кр} = 2095,2$  кДж/кг и  $s_{кр} = 4,4237$  кДж/(кг·К), в которой сливаются нижняя и верхняя пограничные кривые. Следует обратить внимание на то, что критическая точка находится левее и ниже точки максимальной энтальпии  $h''_{max} = 2801,9$  кДж/кг при энтропии, равной  $s'' = 6,18$  кДж/(кг·К) (рис. 3).

### 2.2. Построение кривых постоянной степени сухости ( $x = \text{const}$ )

#### *Диаграмма $p-v$*

Из табл. 2 [4, 5, 6] в интервале давлений от 1 кПа до  $p_{кр}$  находят  $v'$  и  $v''$ . Для заданного значения давления  $p$  рассчитывают удельный объем по формуле (1.1). Все кривые  $x = \text{const}$  сливаются в критической точке К. Пример построения линии постоянной степени сухости для  $x = 0,6$  в  $p,v$  - диаграмме показан на рис. 1.

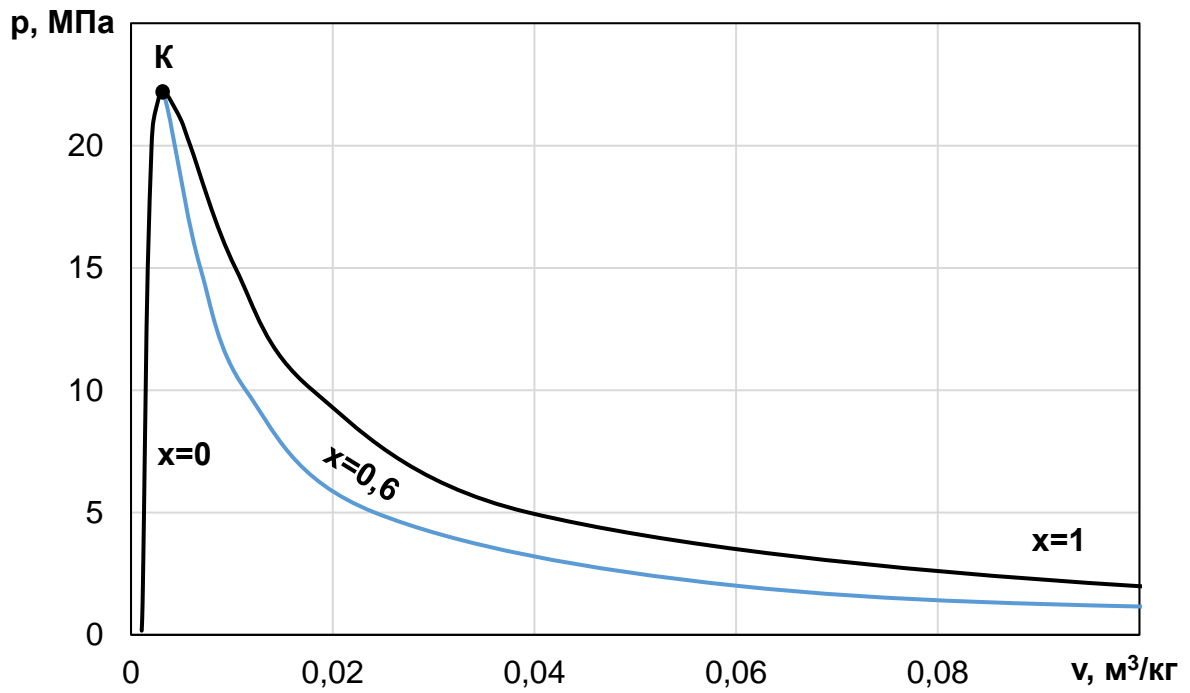


Рис. 1. Пример построения линии  $x = 0,6$  в  $p, v$  - диаграмме воды и водяного пара

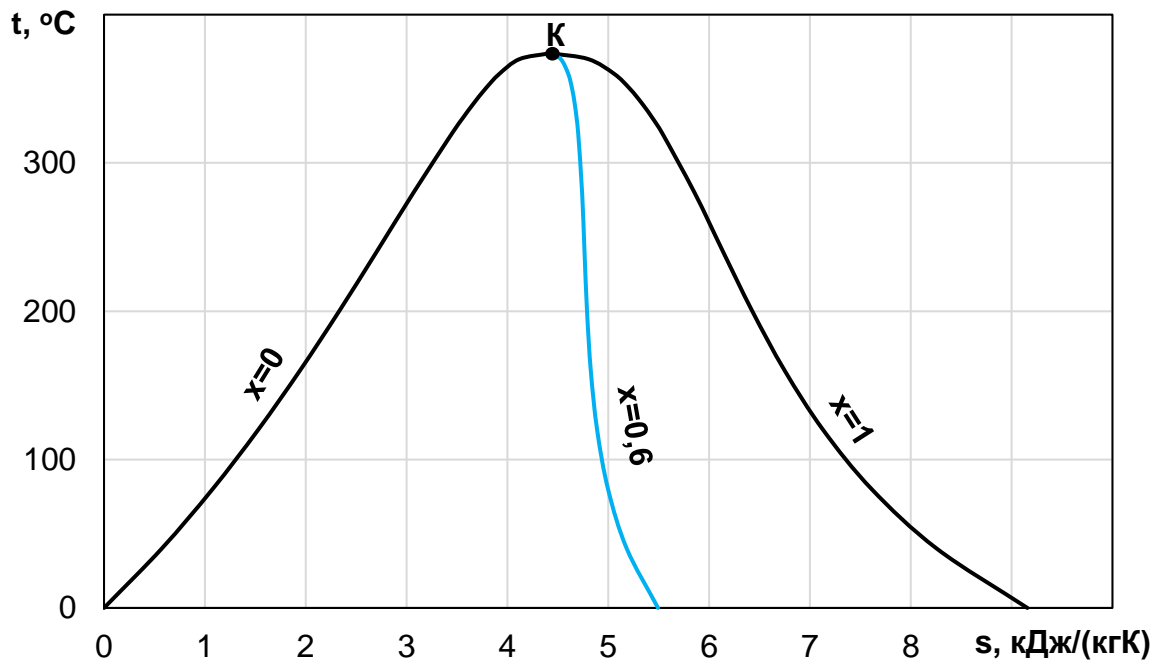


Рис. 2. Пример построения линии  $x = 0,6$  в  $t, s$  - диаграмме воды и водяного пара

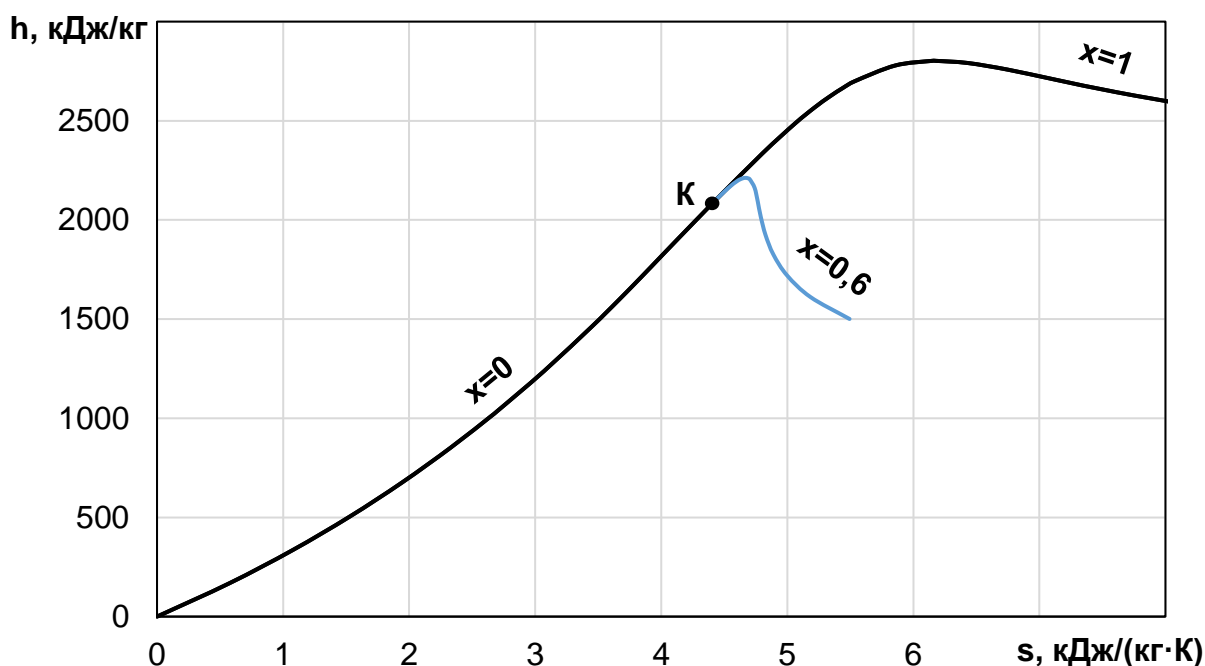


Рис. 3. Пример построения линии  $x = 0,6$  в  $h,s$  – диаграмме воды и водяного пара

### Диаграмма $T-s$

Для построения кривой  $x = \text{const}$  задаем температуры от  $0^\circ\text{C}$  до  $t_{\text{кр}}$  и по табл. 1 [4, 5, 6] находим  $s'$  и  $s''$ . Для данного значения  $t$  определяем энтропию по формуле (1.3). На рис. 2 показан пример построения линии постоянной степени сухости для  $x = 0,6$  в  $T,s$  - диаграмме.

### Диаграмма $h-s$

Дополнительно к полученным для диаграммы  $T-s$  значениям энтропии  $s$  при тех же выбранных температурах  $t$  по табл. 1 [4, 5, 6] определяем  $h'$  и  $h''$  и рассчитываем значение энтальпии по формуле (1.2). В диаграмме  $h-s$  отмечаем точки, соответствующие парным значениям  $h$  и  $s$  при различных температурах (рис. 3).

## 2.3. Построение изобары ( $p = \text{const}$ )

### Диаграмма $p-v$

Изобары в  $p,v$  - диаграмме – горизонтальные прямые.

### Диаграмма $T-s$

При давлении ниже критического ( $p < 22,115 \text{ МПа}$ ) в области влажного насыщенного пара (между пограничными кривыми  $x = 0$  и



$x = 1$ ) изобара совпадает с изотермой, температура которой равна температуре насыщения при заданном давлении (рис.4). Точки пересечения изобары с пограничными кривыми  $x = 0$  и  $x = 1$  по оси абсцисс соответствуют значениям  $s'$  и  $s''$  при заданном давлении.

Например, согласно таблицам воды и водяного пара, при давлении  $p = 2$  МПа температура насыщения  $t_n = 212,37$  °С,  $s' = 2,4468$  кДж/(кг·К),  $s'' = 6,3373$  кДж/(кг·К).

Изобары в области жидкости при  $t < t_n$  строим по данным табл. 3 [4, 5, 6] в интервале температур от 0°С до  $t_n$ . Для этого задаем температуры в соответствующем интервале и по табл. 3 [4, 5, 6] для заданного давления находим значение энтропии  $s$  (рис.4).

Аналогично строим изобары в области перегретого пара при  $t > t_n$  по данным табл. 3 [4, 5, 6] в интервале температур от  $t_n$  до 1000°С.

Изобары при давлении выше критического ( $p > 22,115$  МПа) не имеют горизонтального участка и не пересекают пограничных кривых. Строят их по данным табл. 3 [4, 5, 6] в интервале температур от 0°С до 1000°С (рис.4).

### *Диаграмма h-s*

В области влажного насыщенного пара изобара докритического давления – прямая линия. Для построения изобары при  $p < p_{кр}$  находим из табл. 1 или 2 [4, 5, 6] по заданному давлению точки пересечения с пограничными кривыми  $x = 0 - h', s'$  и  $x = 1 - h'', s''$  (рис. 5). Отмечаем эти точки на  $h,s$  - диаграмме и соединяем прямой линией.

Например, изобара  $p = 1$  МПа пересекает нижнюю пограничную кривую ( $x = 0$ ) при  $h' = 762,6$  кДж/кг и  $s' = 2,1382$  кДж/(кг·К), а верхнюю пограничную кривую ( $x = 1$ ) при  $h'' = 2777$  кДж/кг и  $s'' = 6,5847$  кДж/(кг·К).

Изобары в области жидкости при  $t < t_n$  строим по данным табл. 3 [4, 5, 6] в интервале температур от 0°С до  $t_n$ . Для этого задаем температуры в соответствующем интервале и по табл. 3 [4, 5, 6] для заданного давления находим значения энтальпии  $h$  и энтропии  $s$  (рис. 5).

Аналогично строим изобары в области перегретого пара при  $t > t_n$  по данным табл. 3 в интервале температур от  $t_n$  до 1000°С.

Изобары при давлении выше критического ( $p > 22,115$  МПа) не пересекают пограничных кривых. Их строят по данным табл. 3 [4, 5, 6] в интервале температур от 0°С до 1000°С (рис. 5).

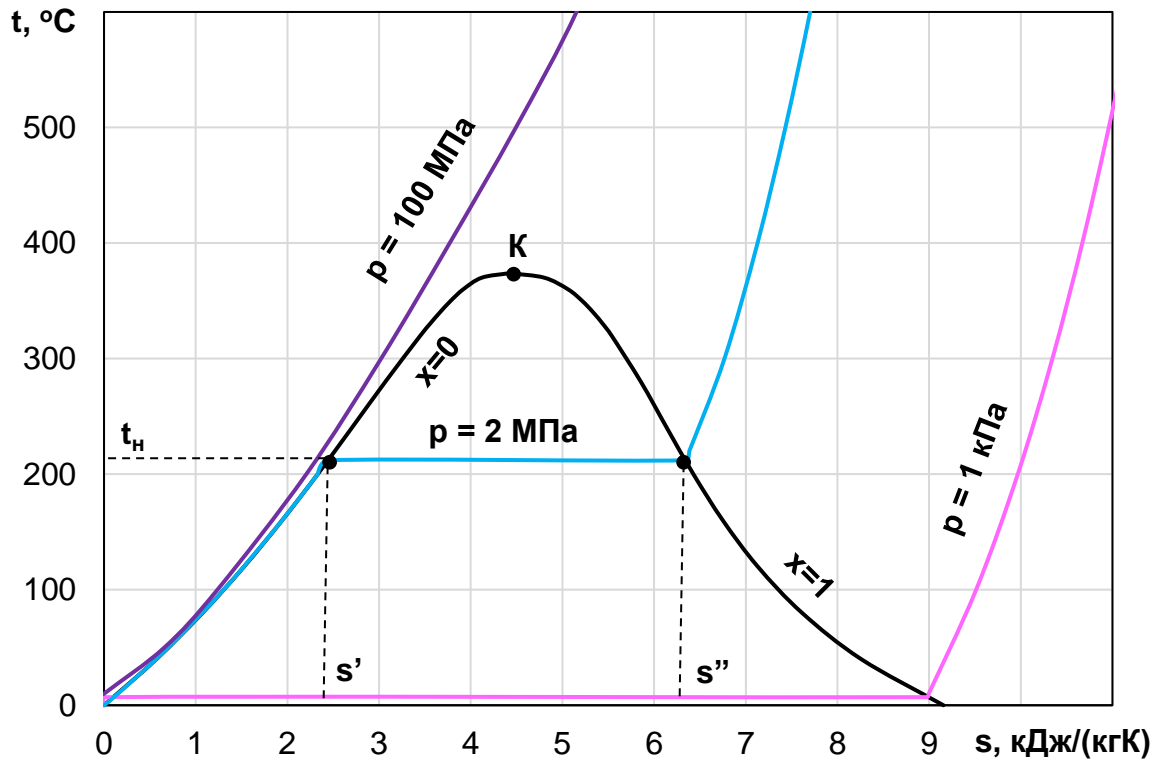


Рис. 4. Пример построения изобар в  $t,s$  - диаграмме воды и водяного пара

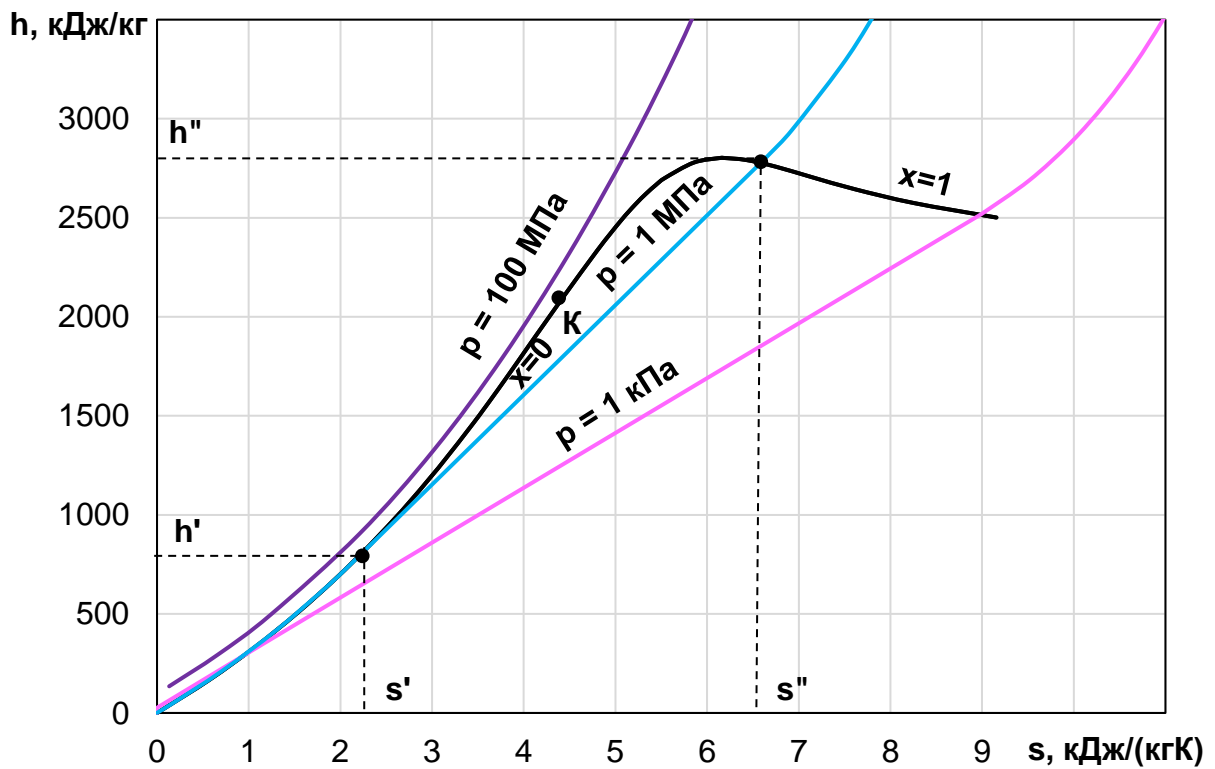


Рис. 5. Пример построения изобар в  $h,s$  - диаграмме воды и водяного пара

## 2.4. Построение изотермы ( $t = \text{const}$ )

### *Диаграмма $p$ - $v$*

При температурах ниже критической ( $t < 374,12$  °С) в области влажного насыщенного пара изотерма совпадает с изобарой, соответствующей давлению насыщения при данной температуре.

Например, при  $t = 300$  °С по табл. 1 [4, 5, 6] видим, что давление насыщения равно  $p_n = 8,5917$  МПа (рис. 6).

Для построения изотермы в области жидкости задаем давления выше давления насыщения ( $p > p_n$ ) при заданной температуре и по табл. 3 [4, 5, 6] по давлению и температуре находим удельный объем  $v$ .

Для построения изотермы в области перегретого пара задаем давления ниже давления насыщения ( $p < p_n$ ) и при заданной температуре находим удельный объем  $v$  (рис. 6).

При температурах выше критической ( $t > 374,12$  °С) изотермы в  $p, v$  - диаграмме не имеют прямолинейного участка, не пересекают пограничных кривых. Их строят по данным табл. 3 [4, 5, 6] для заданного на диаграмме диапазона давлений.

### *Диаграмма $T$ - $s$*

Изотермы в диаграмме  $T$ - $s$  – горизонтальные прямые.

### *Диаграмма $h$ - $s$*

В области влажного насыщенного пара изотермы – прямые линии, точки пересечения которых с пограничными кривыми определяются значениями  $h'$  и  $s'$  (на линии  $x = 0$ ),  $h''$  и  $s''$  (на линии  $x = 1$ ), взятыми из табл. 1 [4, 5, 6] воды и водяного пара при заданной температуре (рис. 7).

Например, при  $t = 200$  °С по табл. 1 [4, 5, 6] определяем:

$$h' = 852,4 \text{ кДж/кг}, \quad s' = 2,3307 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)},$$

$$h'' = 2791,4 \text{ кДж/кг}, \quad s'' = 6,4289 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

В области жидкости и перегретого пара изотермы строят по данным табл. 3 [4, 5, 6]. Предварительно по табл. 1 [4, 5, 6] определяют давление насыщения  $p_n$  при заданной температуре.

Для построения изотермы в области жидкости задаются давлениями выше давления насыщения (от  $p_n$  до 100 МПа) и при заданной температуре из табл. 3 [4, 5, 6] берут парные значения  $h$  и  $s$ .

Изотерму 0°С в области жидкости в  $hs$ -диаграмме строят в увеличенном масштабе (рис. 8).

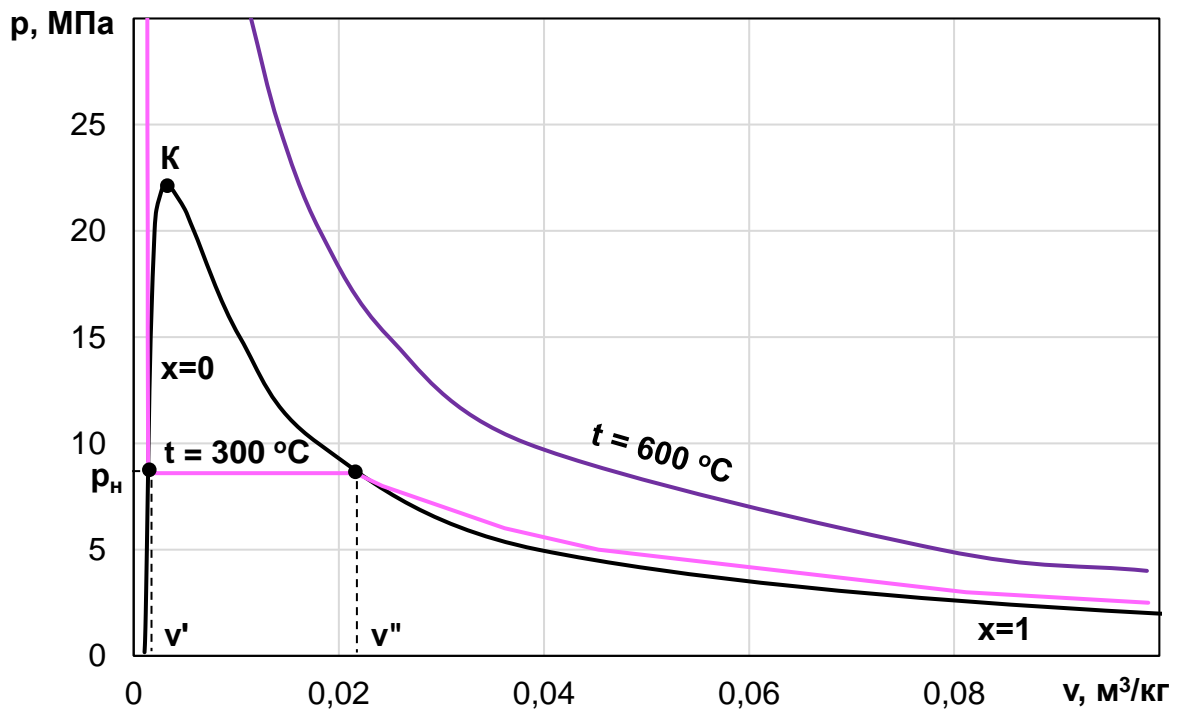


Рис. 6. Пример построения изотерм в  $p, v$  - диаграмме воды и водяного пара

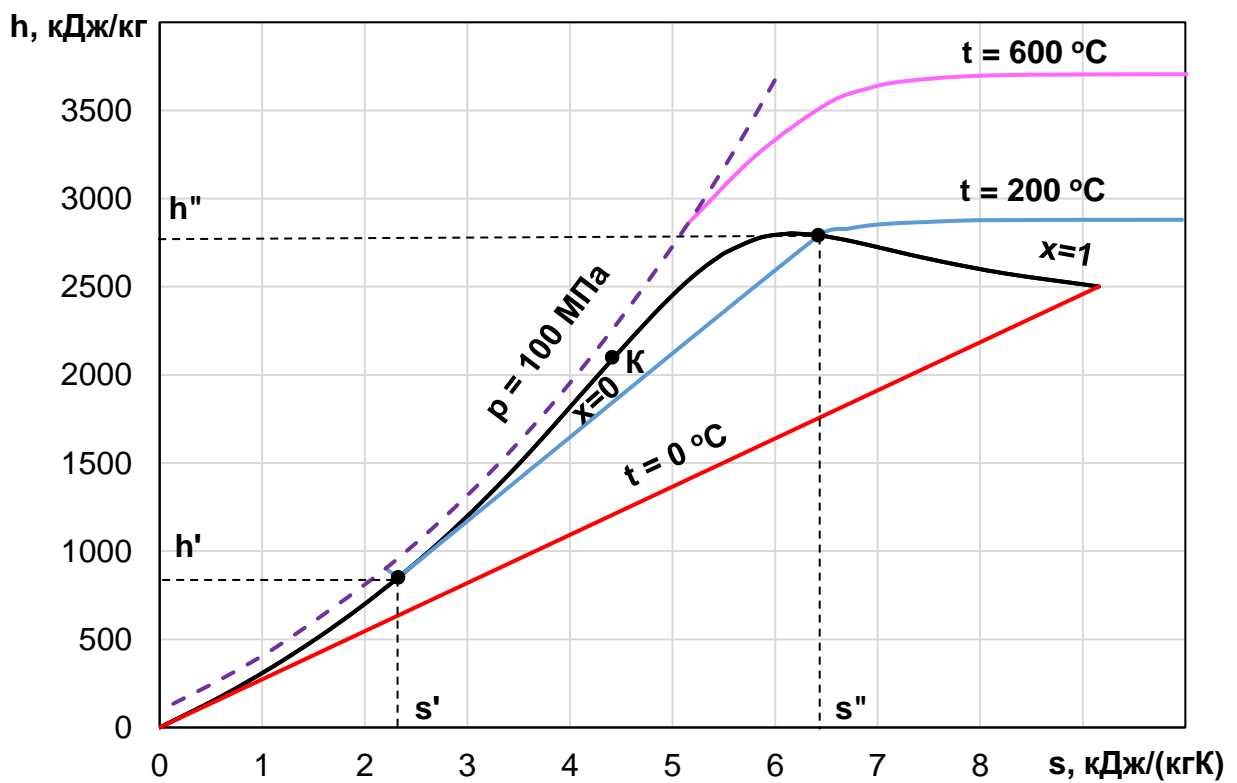


Рис. 7. Пример построения изотерм в  $h, s$  - диаграмме воды и водяного пара

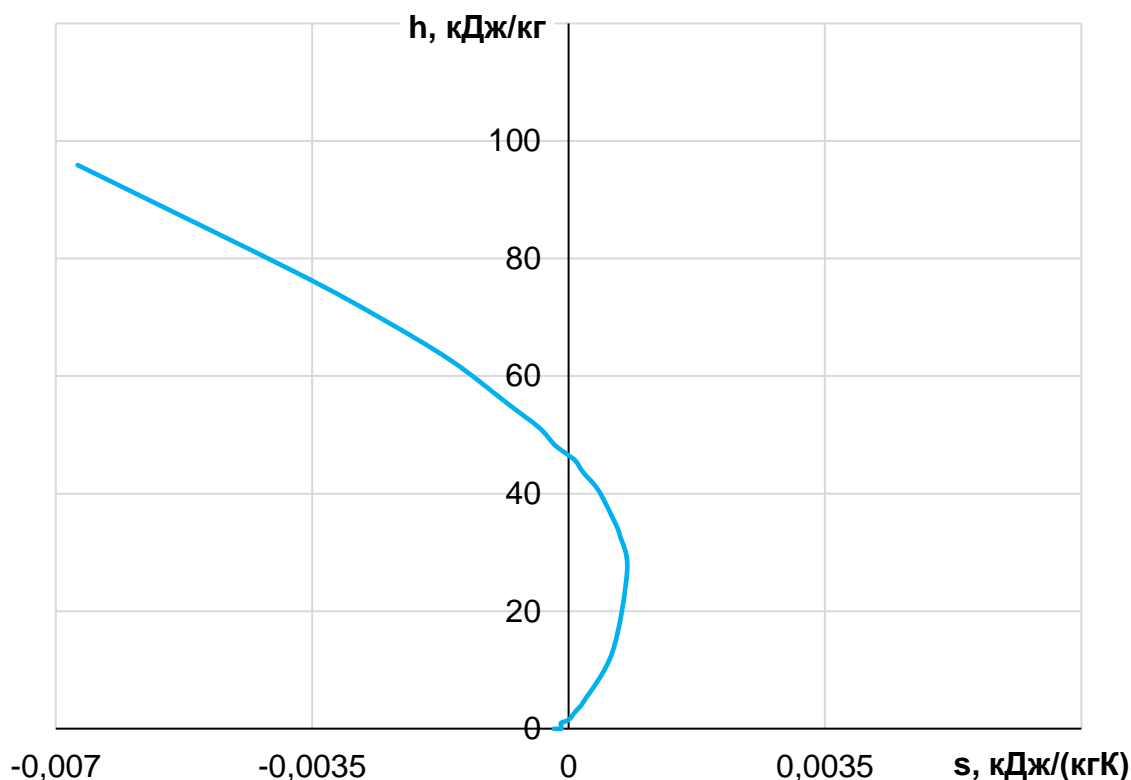


Рис. 8. Построение изотермы  $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  в области жидкости в  $h,s$  - диаграмме

Для области перегретого пара парные значения  $h$  и  $s$  берут при  $p < p_n$  в интервале от  $p_n$  до 1 кПа (рис. 7)

При температурах выше критической изотермы не пересекают пограничных кривых. Их строят по данным табл. 3 [4, 5, 6] во всем диапазоне давлений от 1кПа до 100 МПа (рис. 7).

## 2.5. Построение изохоры ( $v = \text{const}$ )

### *Диаграмма $p-v$*

В диаграмме  $p-v$  изохора – это вертикальная прямая. Если  $v < v_{кр}$ , то изохора пересекает нижнюю пограничную кривую ( $x = 0$ ), если  $v > v_{кр}$ , то – верхнюю пограничную кривую ( $x = 1$ ).

### *Диаграмма $T-s$*

Для построения изохоры в  $T,s$  - диаграмме определяем точку пересечения изохоры с верхней или нижней пограничной кривой.

Изохора  $v > v_{кр}$  пересекает только верхнюю пограничную кривую, поэтому параметры точки пересечения изохоры с кривой  $x = 1$  определяем по табл. 1 или 2 [4, 5, 6] по значению  $v'' = v$  (рис. 9).

Например, для изохоры  $v = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$  точке пересечения изохоры с кривой  $x = 1$  (рис. 9, точка А) соответствуют параметры, определяемые из табл. 2 по значению  $v'' = v = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ :

$$p_A = 9,7 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad t_A = 178,56 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$h_A = h'' = 2775,85 \text{ кДж/кг}, \quad s_A = s'' = 6,5953 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

Для построения изохоры в области перегретого пара задаемся давлениями  $p > p_A$  (для нашего примера  $p_A = 0,97 \text{ МПа}$ ) и из табл. 3 [4, 5, 6] для каждого выбранного давления по удельному объему определяем  $t$  и  $s$ .

Например, для построения изохоры  $v = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$  в области перегретого пара по табл. 3 [4, 5, 6] находим:

при  $p = 1 \text{ МПа}$  и  $v = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$  имеем  $t = 190 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $s = 6,6413 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,

при  $p = 1,5 \text{ МПа}$  и  $v = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$  имеем  $t = 390 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $s = 7,2378 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

Для построения изохоры в области влажного насыщенного пара задаемся температурами  $t < t_A$  и, пользуясь данными табл. 1 [4, 5, 6] воды и водяного пара, определяем степень сухости пара:

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'},$$

а затем рассчитываем удельную энтропию  $s$  по формуле (1.3).

По найденным значениям  $t$  и  $s$  строим изохору в области влажного насыщенного пара (рис. 9).

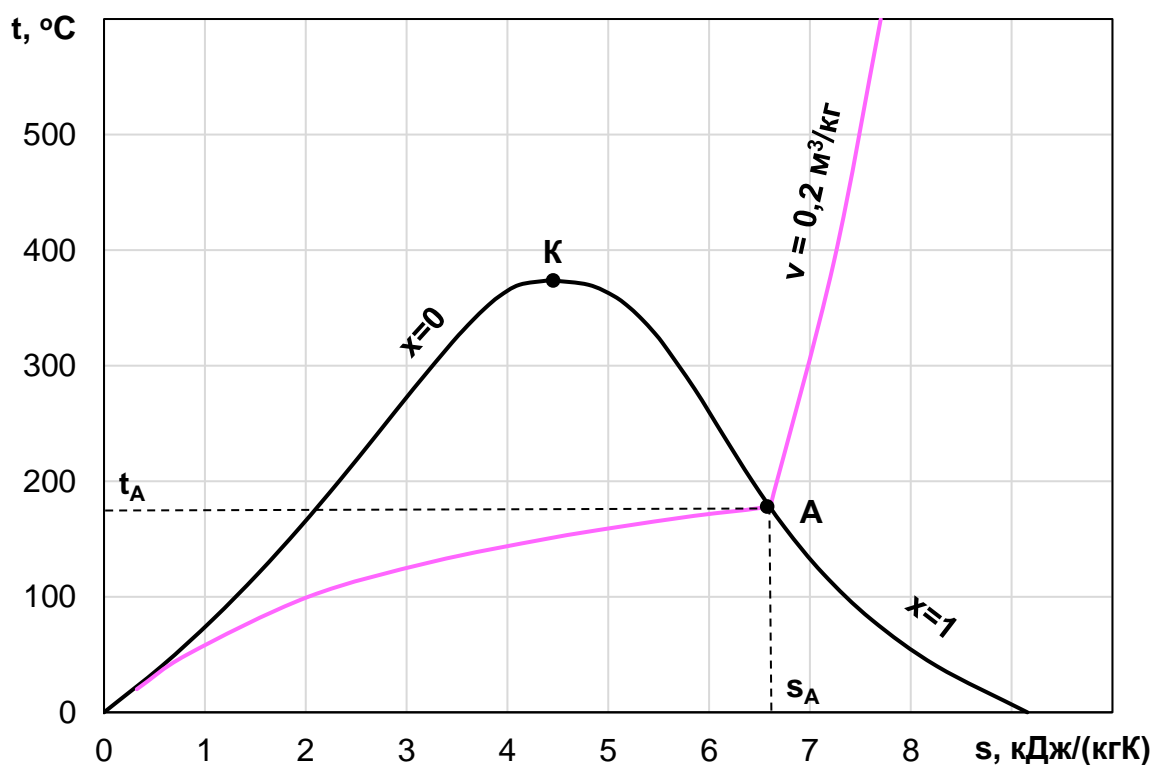


Рис. 9. Пример построения изохоры в  $t,s$  - диаграмме воды и водяного пара

Например, для изохоры  $v = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $t_A = 178,56 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Примем  $t = 150^\circ\text{C}$  и по табл. 1 [4, 5, 6] найдем  $v'$ ,  $v''$ ,  $s'$ ,  $s''$ . Далее рассчитываем степень сухости и удельную энтропию:

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'} = \frac{0,2 - 0,0010908}{0,39261 - 0,0010908} = 0,508;$$

$$s = s' + x \cdot (s'' - s') = 1,8416 + 0,508 \cdot (6,8381 - 1,8416) = 4,38 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Аналогично проводится расчет при других температурах в интервале от  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_A$ .

Если изохора пересекает только нижнюю пограничную кривую ( $v < v_{\text{кр}}$ ), то параметры точки пересечения изохоры с  $x = 0$  определяем по табл. 1 или 2 [4, 5, 6] по значению  $v' = v$ . Далее расчет проводят аналогично вышеизложенному.

### Диаграмма $h-s$

Методика построения изохоры в  $h,s$  - диаграмме аналогична построению в диаграмме  $T-s$ .

Определяем параметры точки пересечения изохоры с верхней пограничной кривой (при  $v > v_{\text{кр}}$ ) и с нижней пограничной кривой (при  $v < v_{\text{кр}}$ ).

Например, для изохоры  $v = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$  параметры точки А (рис. 10) определяют по табл. 2 [4, 5, 6] по  $v'' = v = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ :

$$h_A = h'' = 2775,85 \text{ кДж}/\text{кг}, \quad s_A = s'' = 6,5953 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

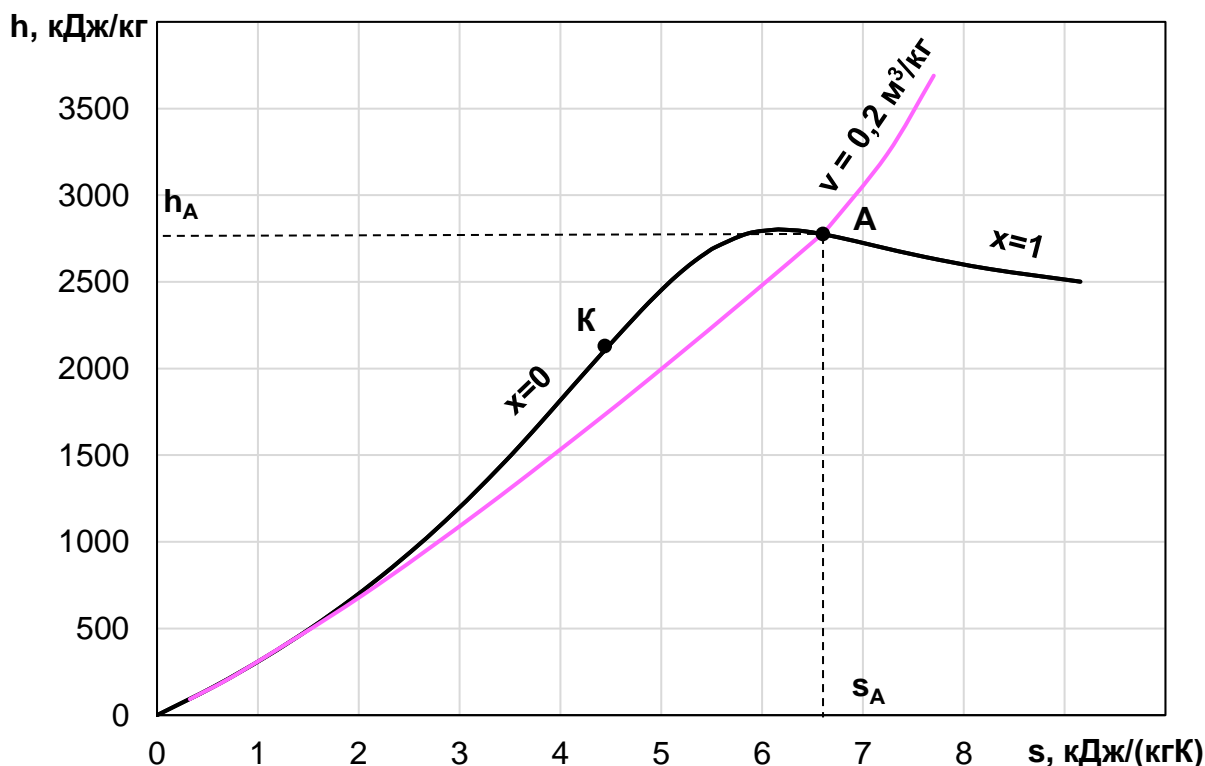


Рис. 10. Пример построения изохоры в  $h,s$  - диаграмме воды и водяного пара

Для построения изохоры в области перегретого пара задаемся давлениями  $p > p_A$ . По давлению и заданному объему находим из табл. 3 [4, 5, 6] парные значения  $h$  и  $s$ .

Например, для изохоры  $v = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $p_A = 0,97 \text{ МПа}$ . Задаем давления  $p > p_A$  и по табл. 3 [4, 5, 6] определяем:

при  $p = 1 \text{ МПа}$  и  $v = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$  имеем  $h = 2802,9 \text{ кДж/кг}$ ,  
 $s = 6,6413 \text{ кДж/(кг·К)}$ ;

при  $p = 1,5 \text{ МПа}$  и  $v = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$  имеем  $h = 3234,5 \text{ кДж/кг}$ ,  
 $s = 7,2378 \text{ кДж/(кг·К)}$ .

Аналогично определяют  $h$  и  $s$  при других давлениях  $p > p_A$  и заданном объеме.

Для построения изохоры в области влажного насыщенного пара при тех же значениях температуры и степени сухости  $x$ , которые были приняты при построении изохоры в  $T, s$  - диаграмме, рассчитывают значения удельной энтальпии  $h$  по формуле (1.2). По парным значениям  $h$  и  $s$  строят изохору в области влажного насыщенного пара (рис. 10).

Например, для изохоры  $v = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $t_A = 178,56 \text{ °C}$ .

Примем  $t = 150 \text{ °C}$  и по табл. 1 [4, 5, 6] найдем  $v', v'', s', s'', h', h'', r$ . Далее рассчитываем степень сухости, удельную энтропию и удельную энтальпию:

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'} = \frac{0,2 - 0,0010908}{0,39261 - 0,0010908} = 0,508;$$

$$s = s' + x \cdot (s'' - s') = 1,8416 + 0,508 \cdot (6,8381 - 1,8416) = 4,38 \text{ кДж/(кг·К)};$$

$$h = h' + x \cdot r = 632,2 + 0,508 \cdot 2114,1 = 1706,16 \text{ кДж/кг}.$$

Аналогично проводится расчет при других температурах в интервале от  $0 \text{ °C}$  до  $t_A$ .

## 2.6. Построение адиабаты ( $s = \text{const}$ )

### *Диаграмма $p-v$*

Определяем точку пересечения адиабаты  $s = \text{const}$  с пограничной кривой.

Если  $s > s_{кр} = 4,4237 \text{ кДж/(кг·К)}$ , то адиабата пересекает верхнюю пограничную кривую, а параметры точки пересечения определяют по данным табл. 1 или 2 [4, 5, 6] по значению  $s = s''$ .

Если  $s < s_{кр}$ , то адиабата пересекает нижнюю пограничную кривую при параметрах  $s = s'$  (рис. 11).

Например, адиабата  $s = 5,6 \text{ кДж/(кг·К)}$  пересекает только верхнюю пограничную кривую, и приближенное значение параметров точки пересечения

$$p_B = 1,02 \cdot 10^7 \text{ Па} = 10,2 \text{ МПа}, \quad v_B = v'' = 0,01756 \text{ м}^3/\text{кг}.$$



Для построения адиабаты в области перегретого пара задаемся давлениями  $p > p_B$  и из табл. 3 [4, 5, 6] по заданному значению  $s$  находим значение удельного объема  $v$ .

Например, для адиабаты  $s = 5,6$  кДж/(кг·К) при  $p = 15$  МПа по табл. 3 [4, 5, 6] определяем  $v = 0,013$  м<sup>3</sup>/кг.

Для построения адиабаты в области влажного насыщенного пара задаемся давлениями  $p < p_B$  и по табл. 2 [4, 5, 6] определяем  $v', v'', s', s''$ . Далее по формулам (1.4) и (1.1) рассчитываем степень сухости  $x$  и удельный объем  $v$ .

Например, для адиабаты  $s = 5,6$  кДж/(кг·К) при  $p = 5$  МПа степень сухости и удельный объем

$$x = \frac{s - s'}{s'' - s'} = \frac{5,6 - 2,9209}{5,9712 - 2,9209} = 0,878;$$

$$v = v' + x \cdot (v'' - v') = 0,0012858 + 0,878 \cdot (0,03941 - 0,0012858) = 0,03475 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Аналогично ведут расчет при других давлениях.

### Диаграмма $T, s$

В диаграмме  $T, s$  адиабата – вертикальная прямая.

### Диаграмма $h, s$

В диаграмме  $h, s$  адиабата – вертикальная прямая.

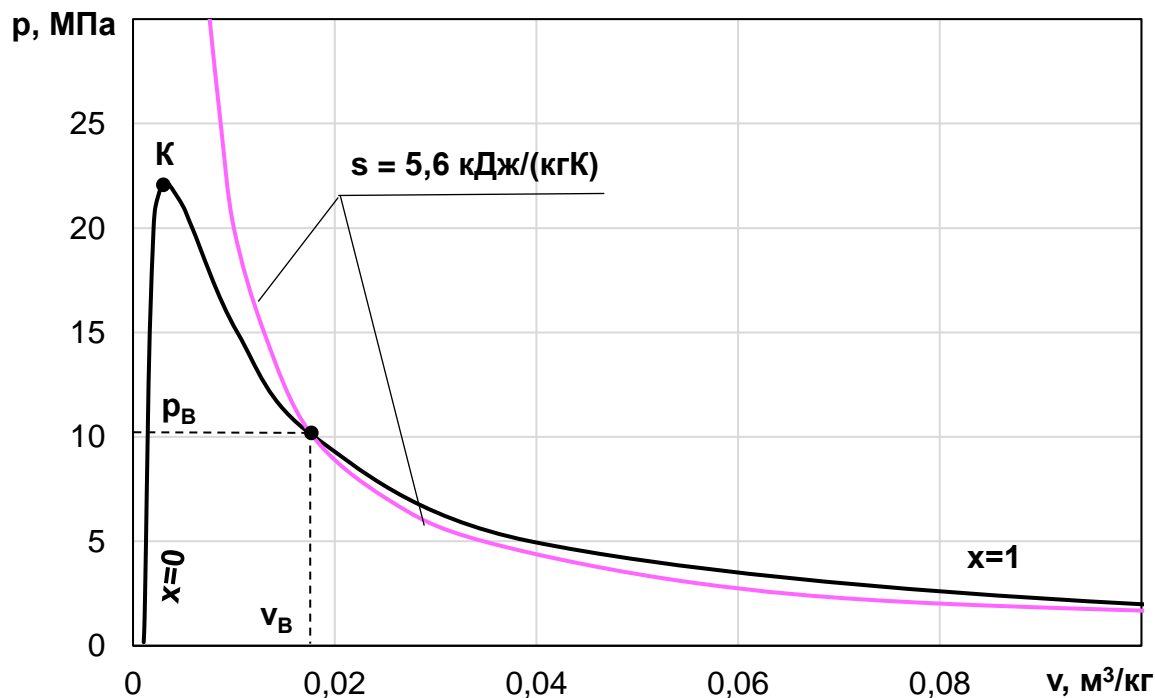


Рис. 11. Пример построения адиабаты в  $p, v$  - диаграмме воды и водяного пара

### 3. ПОСТРОЕНИЕ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ В СРЕДЕ EXCEL

Excel – это компьютерная программа для работы с электронными таблицами, созданная корпорацией Microsoft. Она предназначена для составления таблиц, выполнения расчетов, построения графиков и диаграмм. Excel входит в состав пакета Microsoft Office.

Порядок построения фазовых диаграмм в среде Excel рассмотрим на примере изображения нижней ( $x = 0$ ) и верхней ( $x = 1$ ) пограничных кривых в  $p, v$  - диаграмме (см. разд. 2.1).

По данным табл. 2 воды и водяного пара [4, 5, 6] создаем в Excel таблицу, содержащую значения удельных объемов воды в состоянии насыщения  $v'$  и сухого насыщенного пара  $v''$  в зависимости от давления  $p$  (рис. 12).

	A	B	C	D
1				
2	$p$ , МПа	$v'$	$v''$	
3	0,17	0,0010563	1,031500	
4	0,5	0,0010928	0,374810	
5	1	0,0011274	0,194300	
6	2	0,0011766	0,099530	
7	5	0,0012858	0,039410	
8	10	0,0014526	0,018000	
9	15	0,001658	0,010350	
10	20	0,002038	0,005873	
11	21	0,002218	0,005006	
12	22,1	0,002864	0,003541	
13	22,115	0,003147	0,003147	критическая точка
14				

Рис. 12. Таблица исходных данных в Excel для построения пограничных кривых в  $p, v$  - диаграмме

Переходим на вкладку «Вставка» и в разделе «Диаграммы» выбираем «Точечная с гладкими кривыми» (рис. 13).

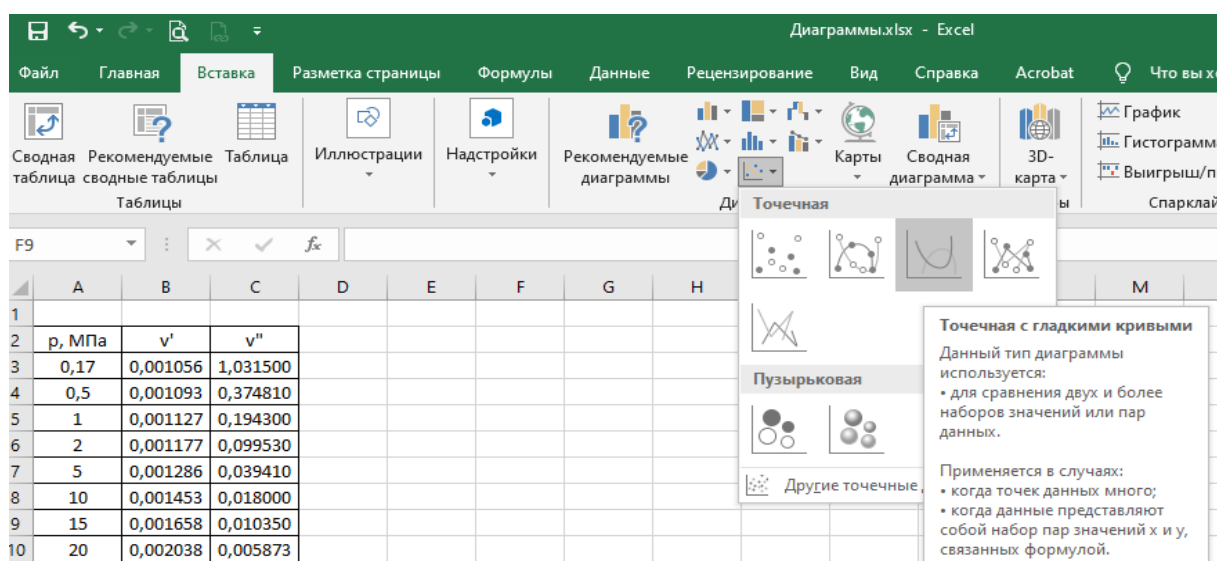


Рис. 13. Выбор типа диаграммы

Появится пустое поле диаграммы. Далее в верхнем меню выбираем «Выбрать данные» или, нажав правой кнопкой мыши на диаграмму, из списка также выбираем «Выбрать данные» (рис. 14).

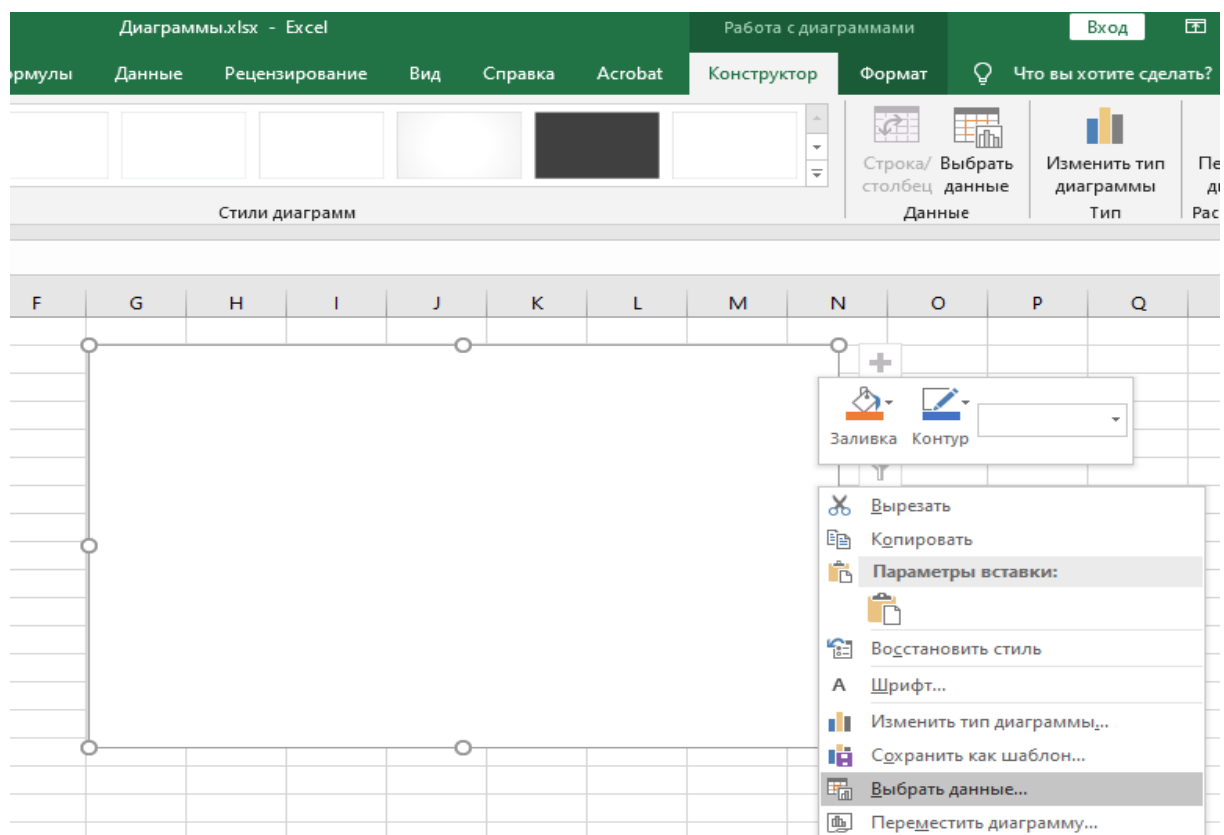


Рис. 14. Выбор данных для диаграммы

В окне «Выбор источника данных» нажимаем кнопку «Добавить» (рис. 15).

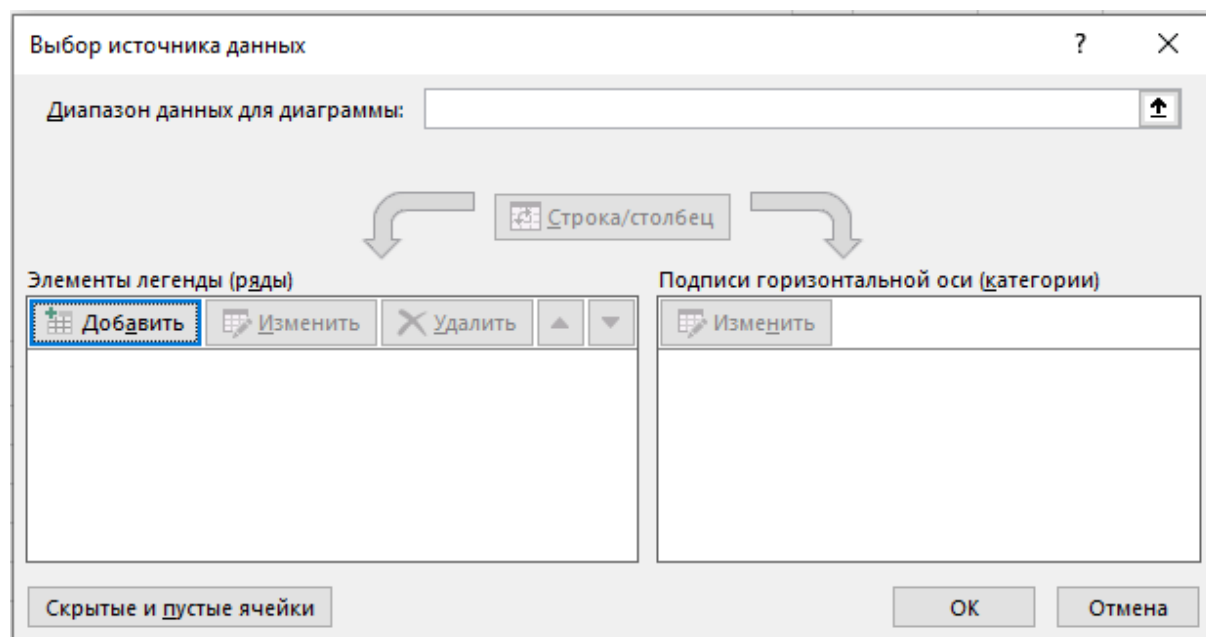




Рис. 15. Окно «Выбор источника данных»

В появившемся окне «Изменение ряда» нажимаем  и выбираем значения по осям X и Y. Для этого левой кнопкой мыши выделяем нужный столбец с данными в таблице: по оси X – значения удельного объема  $v'$  (рис. 16), по оси Y – значения давления  $p$  (рис. 17). Для завершения выбора необходимо нажать .

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2	р, МПа	$v'$	$v''$						
3	0,17	0,001056	1,031500						
4	0,5	0,001093	0,374810						
5	1	0,001127	0,194300						
6	2	0,001177	0,099530						
7	5	0,001286	0,039410						
8	10	0,001453	0,018000						
9	15	0,001658	0,010350						
10	20	0,002038	0,005873						
11	21	0,002218	0,005006						
12	22,1	0,002864	0,003541						
13	22,115	0,003147	0,003147	критическая точка					
14									
15									

Изменение ряда ? X


=Лист1!\$B\$3:\$B\$13 

Рис. 16. Выбор данных по оси X

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2	р, МПа	$v'$	$v''$						
3	0,17	0,001056	1,031500						
4	0,5	0,001093	0,374810						
5	1	0,001127	0,194300						
6	2	0,001177	0,099530						
7	5	0,001286	0,039410						
8	10	0,001453	0,018000						
9	15	0,001658	0,010350						
10	20	0,002038	0,005873						
11	21	0,002218	0,005006						
12	22,1	0,002864	0,003541						
13	22,115	0,003147	0,003147	критическая точка					
14									

Изменение ряда ? X


=Лист1!\$A\$3:\$A\$13 

Рис. 17 Выбор данных по оси Y

После завершения выбора исходных данных необходимо в окне «Изменение ряда» нажать ОК (рис. 18) и на диаграмме появится линия – это нижняя пограничная кривая  $x=0$ . В окне «Изменение ряда» также можно дать название линии, записав его в строчке «Имя ряда».

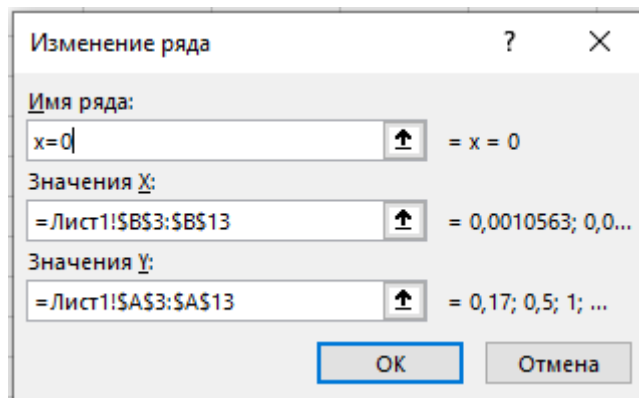




Рис. 18 Окно «Изменение ряда»

Аналогично строим верхнюю пограничную кривую. Для этого в окне «Выбор источника данных» еще раз нажимаем кнопку «Добавить». В появившемся окне «Изменение ряда» нажимаем  и выбираем значения из таблицы: по оси X – значения удельного объема  $v$ , по оси Y – значения давления  $p$ . Для завершения выбора нажимаем . После нажатия в окне «Изменение ряда» кнопки ОК на диаграмме появится вторая линия – это верхняя пограничная кривая  $x=1$  (рис. 19).

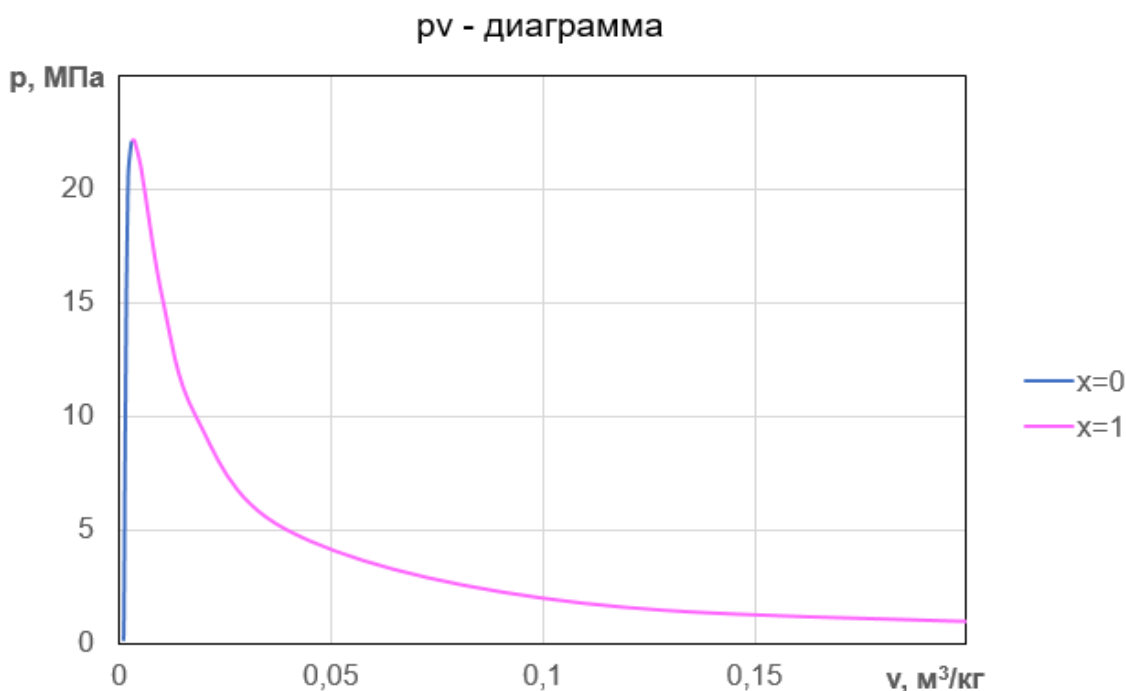





Рис. 19. Нижняя ( $x=0$ ) и верхняя ( $x=1$ ) пограничные кривые в  $p,v$  - диаграмме

Непосредственно на диаграмме можно поменять или удалить название диаграммы.

Для изменения значений по оси X или Y необходимо правой кнопкой щелкнуть в любом месте соответствующей оси и из списка выбрать «Формат оси». Справа появится меню, в котором можно задать максимальное и минимальное значения по оси, а также изменить параметры текста.

Названия линий (легенда) и осей можно добавить, нажав левой кнопкой мыши на поле диаграммы и активировав кнопку  в правом верхнем углу. Кнопкой  можно поменять стиль и цвет диаграммы, а кнопкой  настроить отображение данных (рис. 20).

Изменить название оси можно непосредственно на диаграмме, просто вписав новый текст в соответствующее окно. Для редактирования параметров названия оси необходимо нажать правой кнопкой мыши на название оси и выбрать из списка «Формат названия оси». Справа появится меню, в котором можно изменить расположение текста, заливку, выбрать границы, добавить спецэффекты и многое другое.

Далее на диаграмму можно добавить необходимые изопроцессы. Для этого по таблицам воды и водяного пара [4, 5, 6] создают таблицу в Excel с исходными данными и добавляют линии на диаграмму.

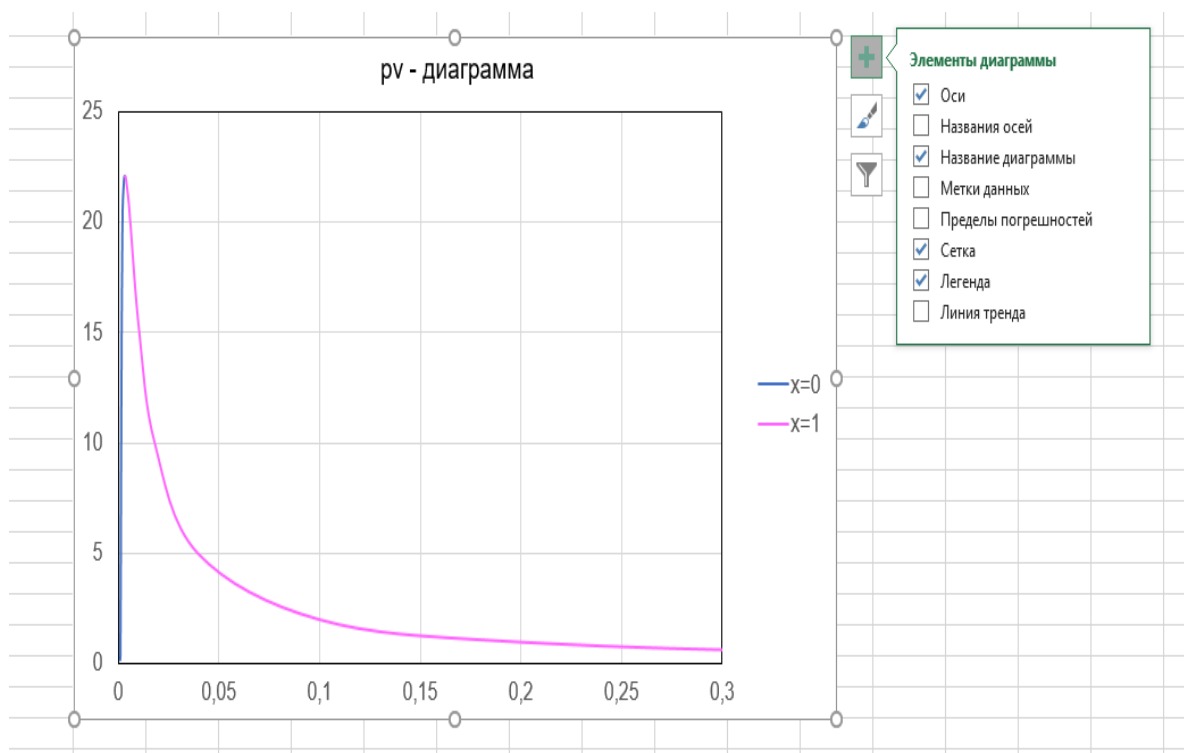


Рис. 20. Добавление элементов диаграммы

## 4. ПОСТРОЕНИЕ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ В СРЕДЕ MATHCAD PRIME

MathCad Prime – это компьютерное программное обеспечение, предназначенное для выполнения сложных инженерных расчетов с их непосредственной визуализацией. MathCad содержит сотни операторов и встроенных функций для решения различных технических задач. Кроме этого, MathCad автоматически вычисляет и проверяет согласованность единиц измерения технических величин.

В MathCad Prime исходные данные для построения графика могут быть заданы аналитически в виде формулы или в виде массива данных, например в форме таблицы.

Порядок построения фазовых диаграмм в MathCad Prime рассмотрим на примере изображения нижней ( $x = 0$ ) и верхней ( $x = 1$ ) пограничных кривых в  $p, v$  - диаграмме (см. разд. 2.1).

В верхнем меню активируем вкладку «Матрицы/таблицы» и выбираем «Вставить таблицу» (рис. 21).

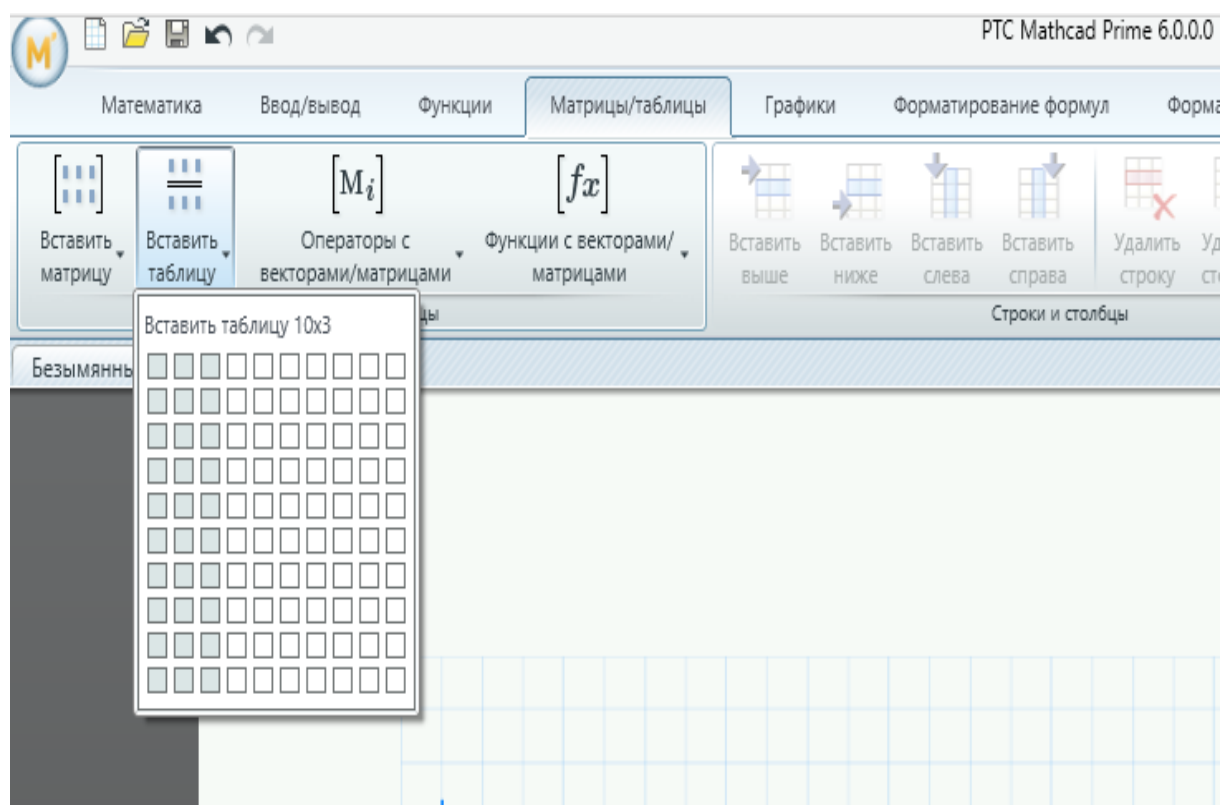


Рис. 21. Создание таблицы в MathCad Prime

По данным табл. 2 воды и водяного пара [4, 5, 6] создаем в MathCad Prime таблицу, содержащую значения удельных объемов воды в состоянии насыщения  $v'$  и сухого насыщенного пара  $v''$  в зависимости от давления  $p$  (рис. 22).

$p$	$v'$	$v''$
$(MPa)$	$\left(\frac{m^3}{kg}\right)$	$\left(\frac{m^3}{kg}\right)$
0.17	0.001056	1.0315
0.5	0.001093	0.37481
1	0.001127	0.1943
2	0.001177	0.09953
5	0.001286	0.03941
10	0.001453	0.0180
15	0.001658	0.01035
20	0.002038	0.005873
21	0.002218	0.005006
22.115	0.003147	0.003147

Рис. 22. Таблица исходных данных в MathCad Prime для построения пограничных кривых в  $p, v$  - диаграмме

Переходим на вкладку «Графики» и в разделе «Вставить график» выбираем «График XY» (рис. 23).

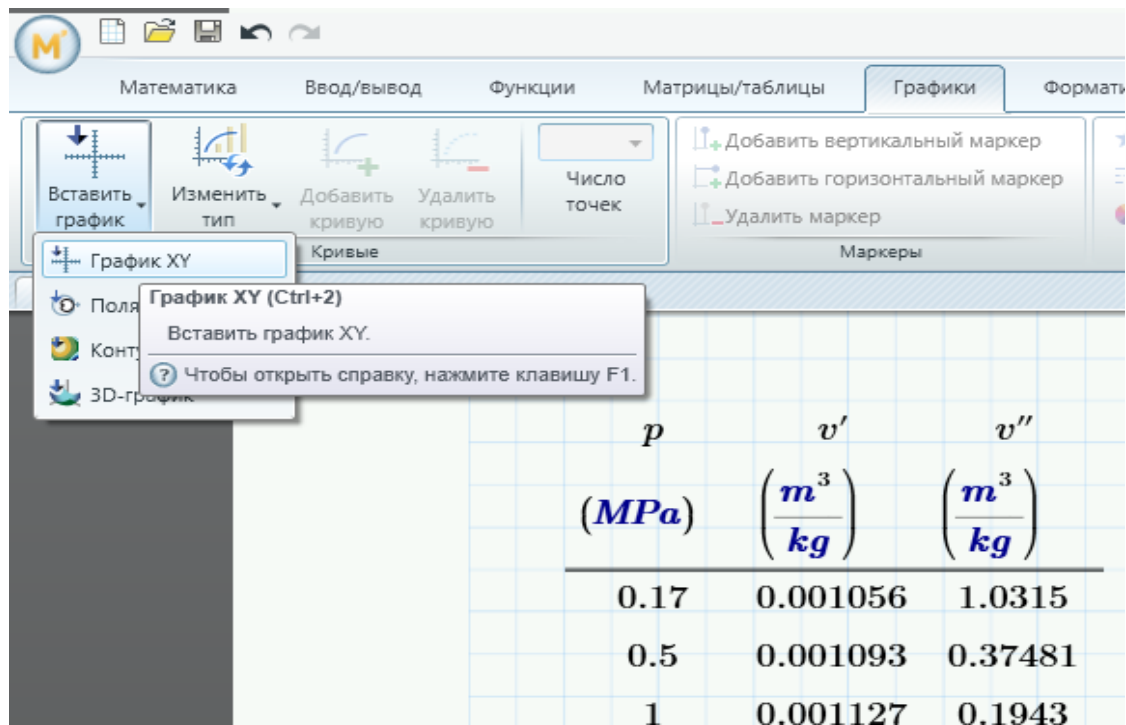


Рис. 23. Выбор графика



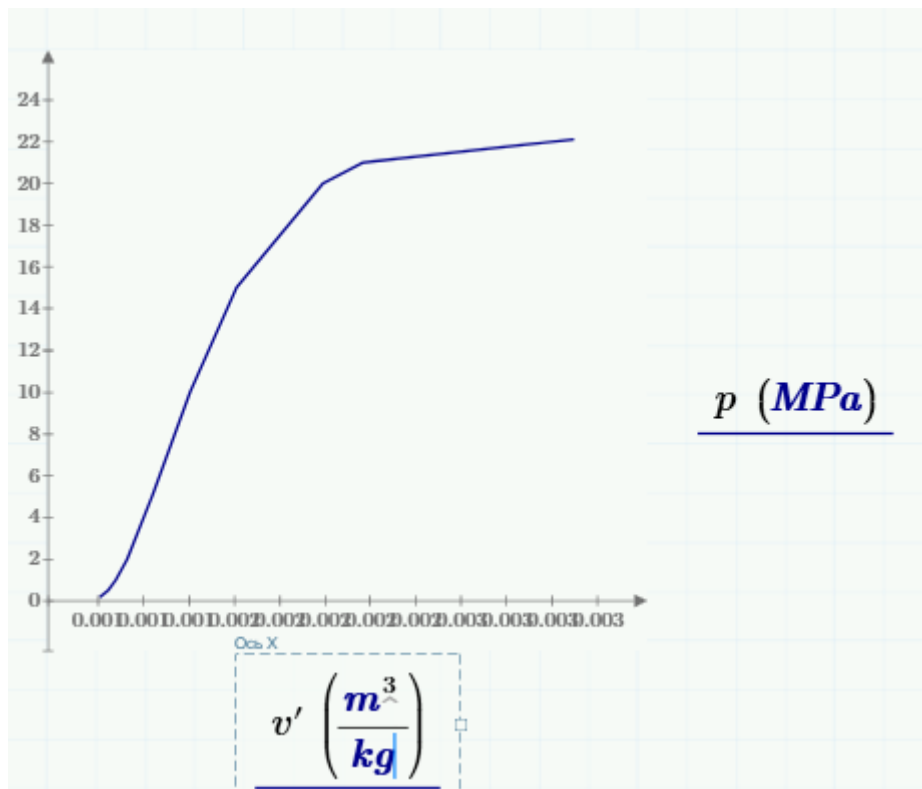


Рис. 24. Построение нижней пограничной кривой ( $x=0$ ) в MathCad Prime

Появится пустое поле графика. Далее непосредственно на графике в окно «Ось X» записываем  $v'$  и размерность  $m^3/kg$ , а в окно «Ось Y» –  $p$  и размерность МПа. Автоматически будет построена линия, соответствующая нижней пограничной кривой  $x = 0$  (рис. 24). При этом, если поменять размерность давания на Па, то подписи по оси Y автоматически изменятся.

Для построения верхней пограничной кривой ( $x = 1$ ) ставим курсор в окно « $v'$  ( $m^3/kg$ )» и в главном меню выбираем «Добавить кривую» (рис. 25).

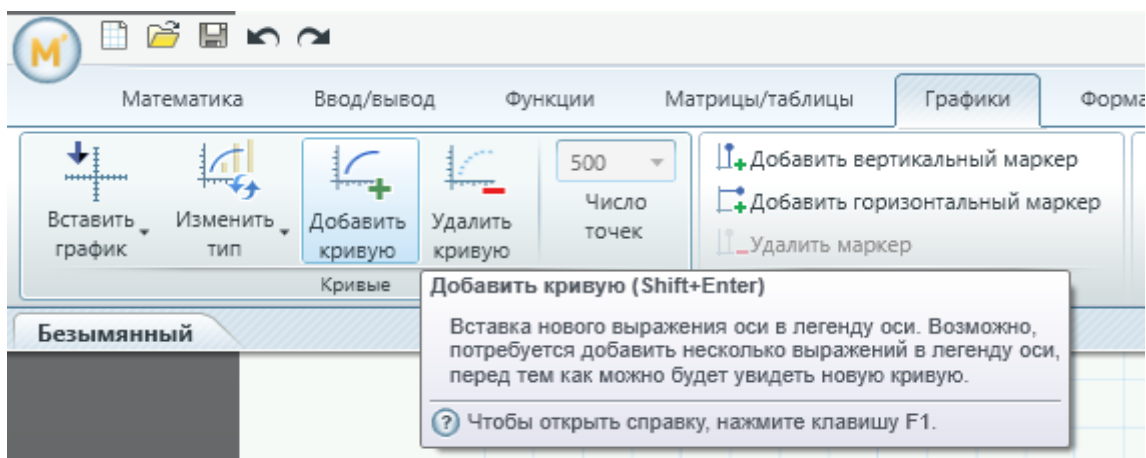


Рис. 25. Добавление кривой на графике

В окно «Ось X» записываем  $v''$ . Размерность  $m^3/kg$  появится автоматически. На графике будет построена линия, соответствующая верхней пограничной кривой  $x = 1$  (рис. 26).

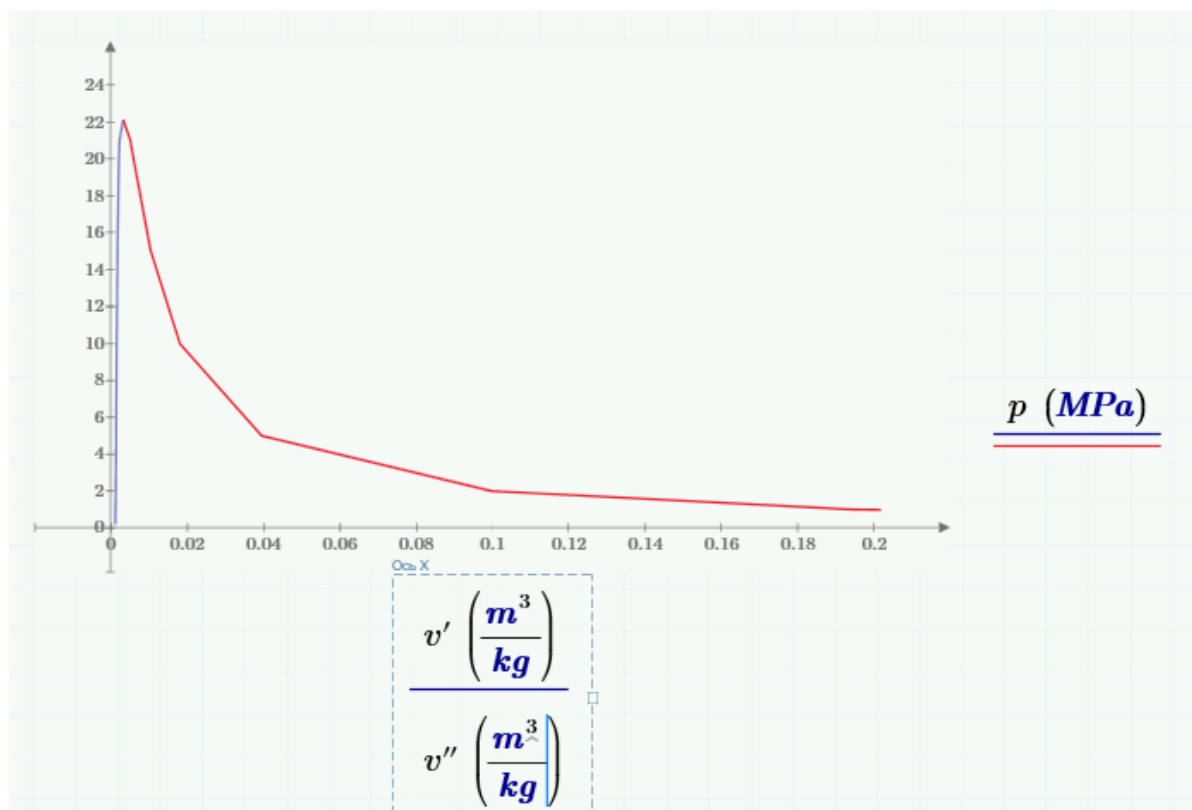


Рис. 26. Построение верхней пограничной кривой ( $x=1$ ) в MathCad Prime

Диапазон изменения значений по осям задается непосредственно на графике. Для этого достаточно переписать крайнее значение и график изменится автоматически.

В главном меню во вкладке «Графики» можно изменить цвет линий, их толщину и стиль. Формат надписей редактируется во вкладке «Форматирование формул».

Далее на график можно добавить необходимые изопродессы. Для этого по таблицам воды и водяного пара [4, 5, 6] дополняют исходные данные и добавляют линии на графике.

## 5. РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА

Расчет процессов воды и водяного пара выполняют в следующей последовательности:

1. Определяют фазовое состояние воды и водяного пара и находят начальные и конечные параметры;

2. Рассчитывают удельную теплоту  $q$  и удельную работу  $\ell$  заданного процесса;

3. Строят процессы в  $p, v$  -,  $T, s$  - и  $h, s$  - диаграммах в соответствии с заданными условиями.

Определение параметров воды и водяного пара выполняют по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара [4, 5, 6] и по  $h, s$  - диаграмме.

Основные формулы для расчета процессов воды и водяного пара приведены в таблице.

Процесс	$q$ , кДж/кг	$\ell$ , кДж/кг	$\Delta u$ , кДж/кг
$p = \text{const}$	$h_2 - h_1$	$p \cdot (v_2 - v_1)$	$h_2 - h_1 - p \cdot (v_2 - v_1)$
$v = \text{const}$	$u_2 - u_1$	0	$h_2 - h_1 - v \cdot (p_2 - p_1)$
$T = \text{const}$	$T \cdot (s_2 - s_1)$	$q - \Delta u$	$h_2 - h_1 - (p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1)$
$s = \text{const}$	0	$-\Delta u$	$h_2 - h_1 - (p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1)$

Индексом "1" обозначены параметры в начале процесса, индексом "2" – в конце процесса:  $h$  – удельная энтальпия, кДж/кг;  $p$  – давление, кПа;  $v$  – удельный объем, м<sup>3</sup>/кг;  $T$  – абсолютная температура, К;  $s$  – удельная энтропия, кДж/(кг·К).

Например, требуется рассчитать адиабатный процесс воды и водяного пара, если известно  $p_1 = 5$  МПа,  $x_1 = 0,88$  и  $p_2 = 15$  МПа.

1. Определяем фазовое состояние воды и водяного пара и находим начальные и конечные параметры в соответствии с рекомендациями, приведенными в разд. 1.

В начале адиабатного процесса (точка 1) задана степень сухости  $x_1$ , следовательно это область влажного насыщенного пара. По табл. 2 [4, 5, 6] при давлении  $p_1 = 5 \cdot 10^6$  Па определяем:

$$h' = 1154,6 \text{ кДж/кг}, \quad s' = 2,9209 \text{ кДж/(кг·К)}, \quad v' = 0,0012858 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$h'' = 2792,8 \text{ кДж/кг}, \quad s'' = 5,9712 \text{ кДж/(кг·К)}, \quad v'' = 0,03941 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

По формулам (1.1) ÷ (1.3) рассчитываем удельный объем, эн-

тальпию и энтропию в начале адиабатного процесса:

$$v_1 = v' + x_1 \cdot (v'' - v') = 0,0012858 + 0,88 \cdot (0,03941 - 0,0012858) = 0,0348 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$h_1 = h' + x_1 \cdot (h'' - h') = 1154,6 + 0,88 \cdot (2792,8 - 1154,6) = 2596,2 \text{ кДж/кг};$$

$$s_1 = s' + x_1 \cdot (s'' - s') = 2,9209 + 0,88 \cdot (5,9712 - 2,9209) = 5,6 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Так как точка 1 находится в области влажного насыщенного пара, температура  $t_1 = t_n = 263,92 \text{ }^\circ\text{C}$  при давлении  $p_1$ .

Параметры в конце адиабатного процесса (точка 2) находим по  $p_2 = 15 \text{ МПа}$  и  $s_1 = s_2 = 5,6 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Для этого по табл. 2 [4, 5, 6] при  $p_2 = 1,5 \cdot 10^7 \text{ Па}$  определяем  $s' = 3,6877 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  и  $s'' = 5,3122 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Так как  $s_2 > s''$ , точка 2 расположена в области перегретого пара.

По табл. 3 [4, 5, 6] при  $p_2 = 15 \text{ МПа}$  и  $s_2 = 5,6 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  определяем  $v_2 = 0,0129 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $h_2 = 2791,4 \text{ кДж/кг}$ ;  $t_2 = 363,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

2. Рассчитываем удельную теплоту, изменение внутренней энергии и удельную работу для адиабатного процесса 1-2:

$$q = 0 \text{ кДж/кг, т.к. процесс адиабатный};$$

$$\Delta u = h_2 - h_1 - (p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1) = 2791,4 - 2596,2 - (15 \cdot 10^3 \cdot 0,0129 - 5 \cdot 10^3 \cdot 0,0348) = 176,2 \text{ кДж/кг};$$

$$l = -\Delta u = -176,2 \text{ кДж/кг}.$$

3. Строим адиабатный процесс 1-2 в  $p, v$  -,  $T, s$  - и  $h, s$  - диаграммах, фиксируя начало и конец процесса изобарами, изохорами или изотермами (рис. 27 ÷ 29).

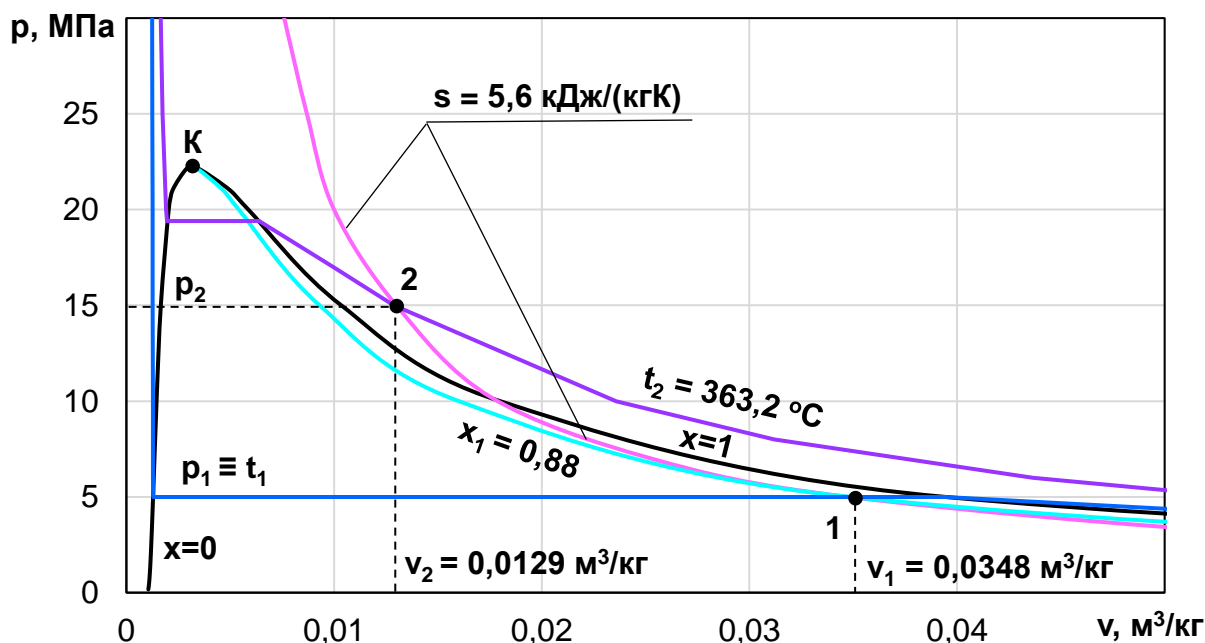


Рис. 27. Пример построения адиабатного процесса 1-2 в  $p, v$  - диаграмме воды и водяного пара

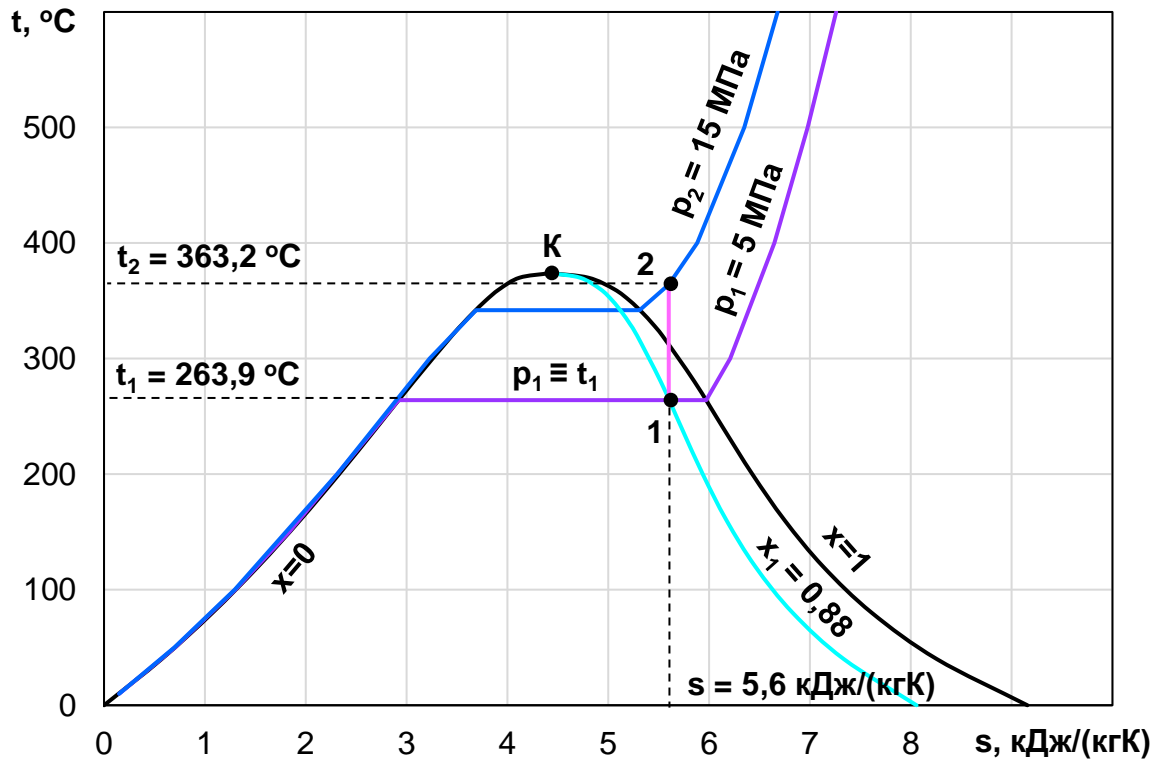


Рис. 28. Пример построения адиабатного процесса 1-2 в  $t,s$  - диаграмме воды и водяного пара

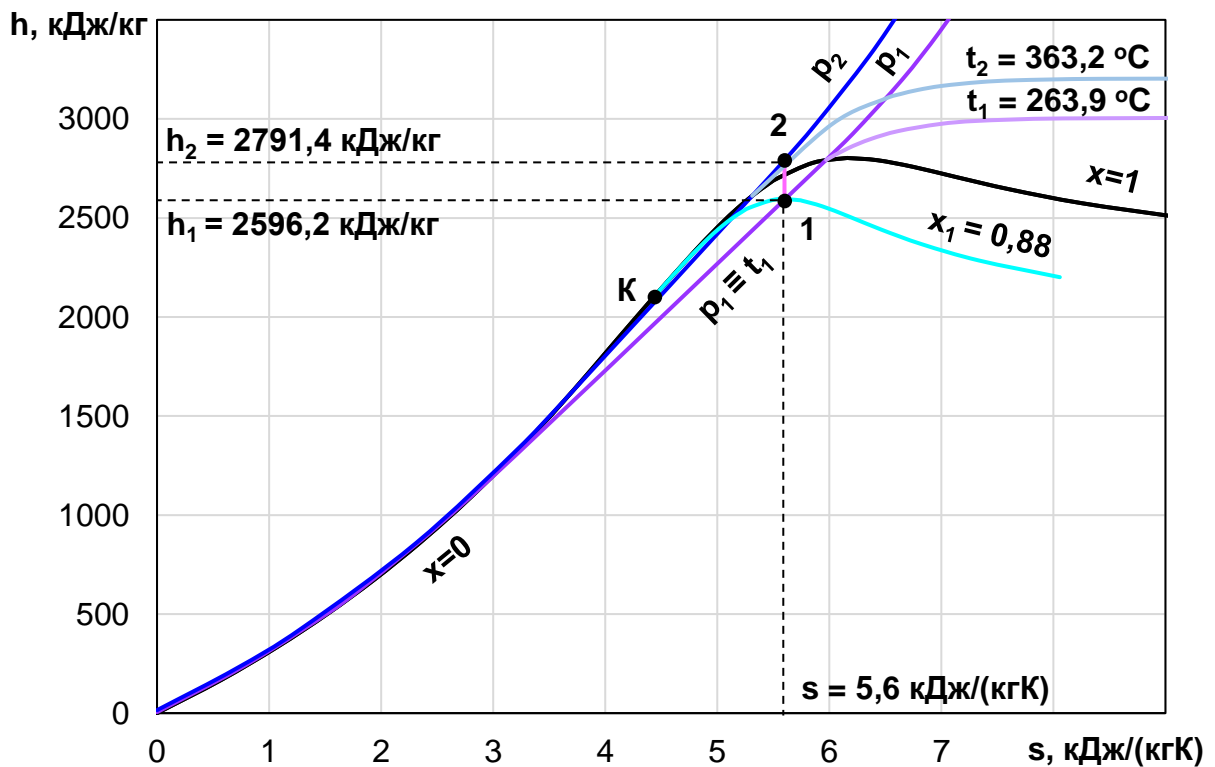


Рис. 29. Пример построения адиабатного процесса 1-2 в  $h,s$  - диаграмме воды и водяного пара

## РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Чухин, Иван Михайлович.** Техническая термодинамика. Ч. 1.: учеб. пособие / И.М.Чухин; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина». – Иваново, 2006. – 224 с.
2. **Чухин, Иван Михайлович.** Техническая термодинамика. Ч. 2: учеб. пособие / И.М. Чухин; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 228 с.
3. **Чухин, Иван Михайлович.** Сборник задач по технической термодинамике: учеб. пособие / И.М. Чухин; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 248 с.
4. **Ривкин, Соломон Лазаревич.** Теплофизические свойства воды и водяного пара: справочник / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
5. **Александров, Алексей Александрович.** Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: справочник / А.А. Александров, Б.А.Григорьев. – М.: МЭИ, 2003. – 168 с.
6. **Александров, Алексей Александрович.** Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: справочник / А.А. Александров, К.А. Орлов, В.Ф. Очков. – М.: МЭИ, 2009. – 224 с.
7. **Частухина, Маргарита Ивановна.** Фазовые диаграммы воды и водяного пара и их построение: метод. указания / М.И. Частухина, С.И. Девочкина: ИЭИ. – Иваново, 1987. – 24 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. МЕТОДИКА ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТАБЛИЦ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА .....	4
2. ПОСТРОЕНИЕ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ .....	6
2.1. Построение нижней ( $x=0$ ) и верхней ( $x=1$ ) пограничных кривых.....	6
2.2. Построение кривых постоянной степени сухости ( $x = \text{const}$ ).....	6
2.3. Построение изобары ( $p = \text{const}$ ).....	8
2.4. Построение изотермы ( $t = \text{const}$ ).....	11
2.5. Построение изохоры ( $v = \text{const}$ ).....	13
2.6. Построение адиабаты ( $s = \text{const}$ ) .....	16
3. ПОСТРОЕНИЕ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ В СРЕДЕ EXCEL .....	18
4. ПОСТРОЕНИЕ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ В СРЕДЕ MATHCAD PRIME.....	23
5. РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА.....	27
РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	30

ПОСТРОЕНИЕ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ  
ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА

Методические указания для проведения практических и лабораторных занятий по курсу «Техническая термодинамика»

Составители РАКУТИНА Дарья Валериевна  
ПЕКУНОВА Анна Витальевна

Редактор МИХАЛЕВА Натела Борисовна

Подписано в печать . . . 2021 г. Формат 60×84 1/16.  
Печать плоская. Усл. печ. л.  
Тираж 50 экз. Заказ  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический  
университет имени В.И. Ленина»  
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.