




**ТЕМА 3. ТЕРМОДИНАМИКА
РЕАЛЬНЫХ РАБОЧИХ ТЕЛ.
ВОДЯНОЙ ПАР**



**Вопрос №1. Свойства и уравнения
состояния реальных газов**

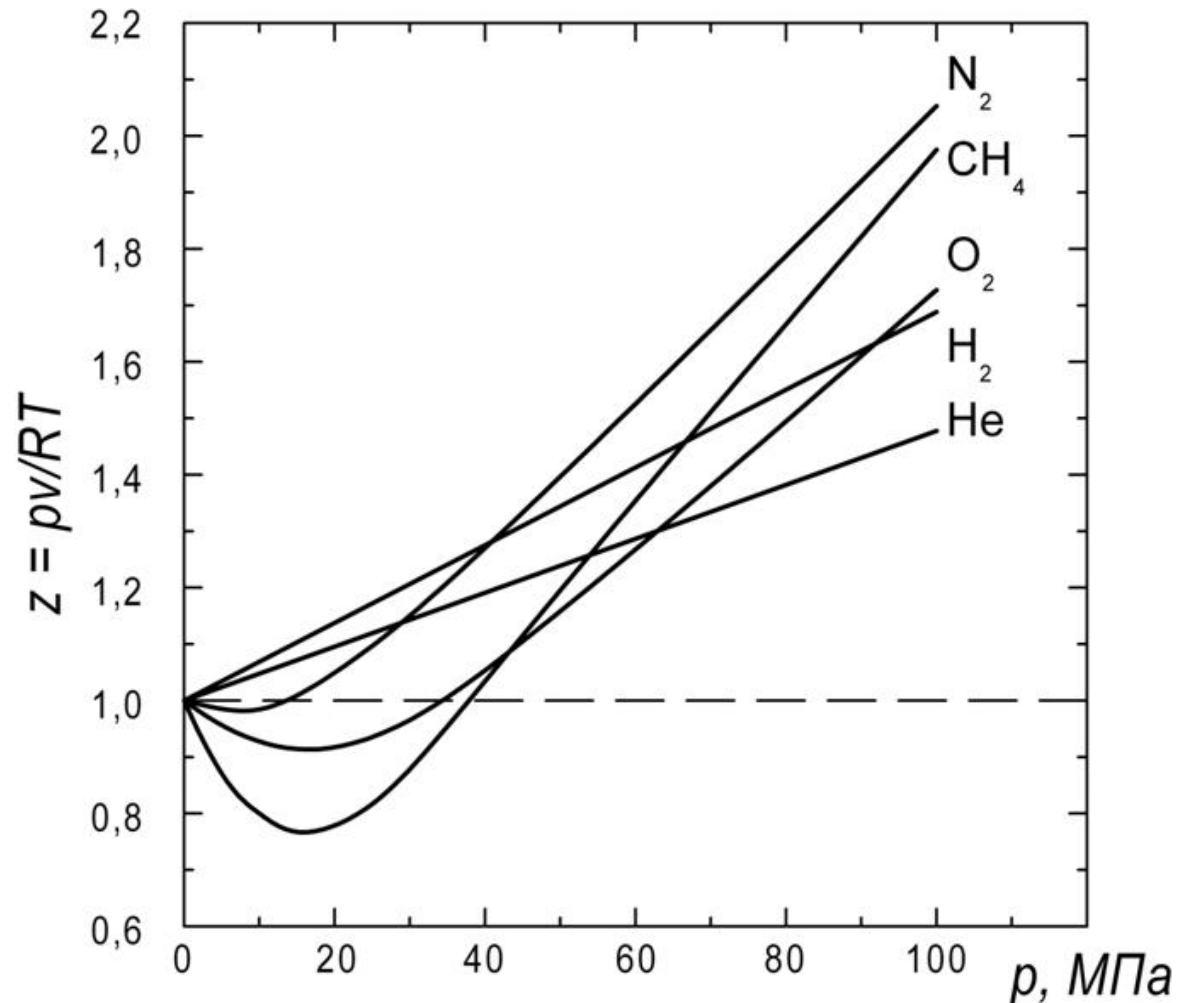
$$Pv = RT.$$

$$z = \frac{Pv}{RT}$$



Зависимость коэффициента сжимаемости z
от давления для некоторых газов.

Зависимость коэффициента сжимаемости z от давления для некоторых газов.





Уравнение Ван-дер-Ваальса (1873 г.)

Уравнение Ван-дер-Ваальса (1873 г.)

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT,$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса (1873 г.)

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT,$$

где a и b – экспериментально полученные постоянные для данного газа.

Уравнение Ван-дер-Ваальса (1873 г.)

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT,$$

где a и b – экспериментально полученные постоянные для данного газа.

$$\frac{a}{v^2}$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса (1873 г.)

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT,$$

где a и b – экспериментально полученные постоянные для данного газа.


$$\frac{a}{v^2} = a\rho^2$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса (1873 г.)


$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT,$$

где a и b – экспериментально полученные постоянные для данного газа.

$$\frac{a}{v^2} = a\rho^2 \quad \text{– *внутреннее давление.*}$$




Например, для воды при температуре 20°C внутреннее давление составляет 1050 МПа.



Например, для воды при температуре 20°C внутреннее давление составляет 1050 МПа.


Величина b учитывает объём, занимаемый молекулами и в расчётах принимается равной учетверённому объёму молекул газа



Например, для воды при температуре 20° С внутреннее давление составляет 1050 МПа.

Величина b учитывает объём, занимаемый молекулами и в расчётах принимается равной учетверённому объёму молекул газа

$$b = 4 \cdot v_{\text{м}}.$$




Например, для воды при температуре 20°C внутреннее давление составляет 1050 МПа.


Величина b учитывает объём, занимаемый молекулами и в расчётах принимается равной учетверённому объёму молекул газа

$$b = 4 \cdot v_{\text{м}}.$$

Тогда оставшийся свободный объём пространства, в котором движутся молекулы, будет равен $(v - b)$.



Уравнение Ван-дер-Ваальса качественно верно отображает поведение веществ в жидком и газообразном состояниях, однако оно даёт значительные ошибки при больших плотностях газа.



В 1939 г. М.П. Вукалович и И.И. Новиков внесли поправки в уравнение Ван-дер-Ваальса и предложили новое универсальное уравнение состояния реальных газов

В 1939 г. М.П. Вукалович и И.И. Новиков внесли поправки в уравнение Ван-дер-Ваальса и предложили новое универсальное уравнение состояния реальных газов

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT \left(1 - \frac{C}{vT^{\frac{3+2m}{2}}} \right).$$

В 1939 г. М.П. Вукалович и И.И. Новиков внесли поправки в уравнение Ван-дер-Ваальса и предложили новое универсальное уравнение состояния реальных газов

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT \left(1 - \frac{C}{vT^{\frac{3+2m}{2}}} \right).$$

где C и m – постоянные, определяемые на основании опытных данных.



Значения постоянных:

$$R = 461,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$a = 620 \text{ Н} \cdot \text{м}^4/\text{кг}^2;$$

$$b = 0,0009 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$C = 405000 \text{ м}^3 \cdot \text{К}/\text{кг};$$

$$m = 1,968.$$



**Вопрос №2. Процесс парообразования.
Основные понятия и определения**



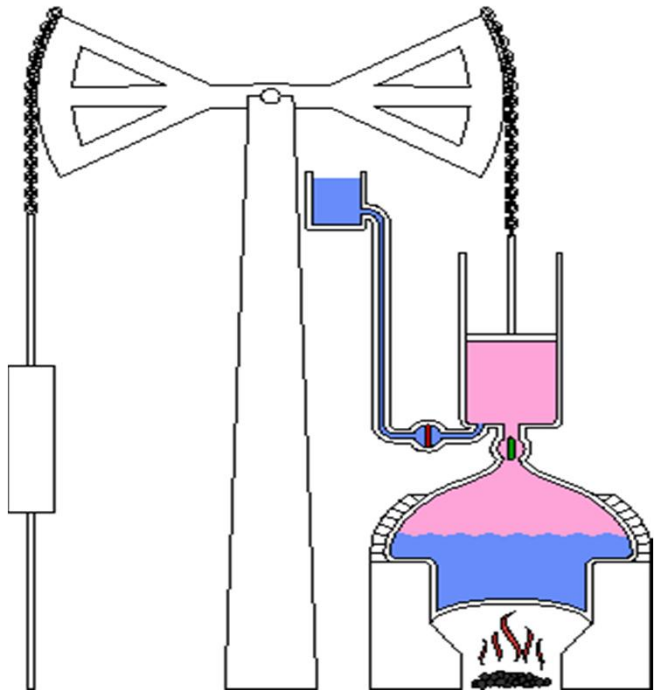
Процесс парообразования.

Основные понятия и определения

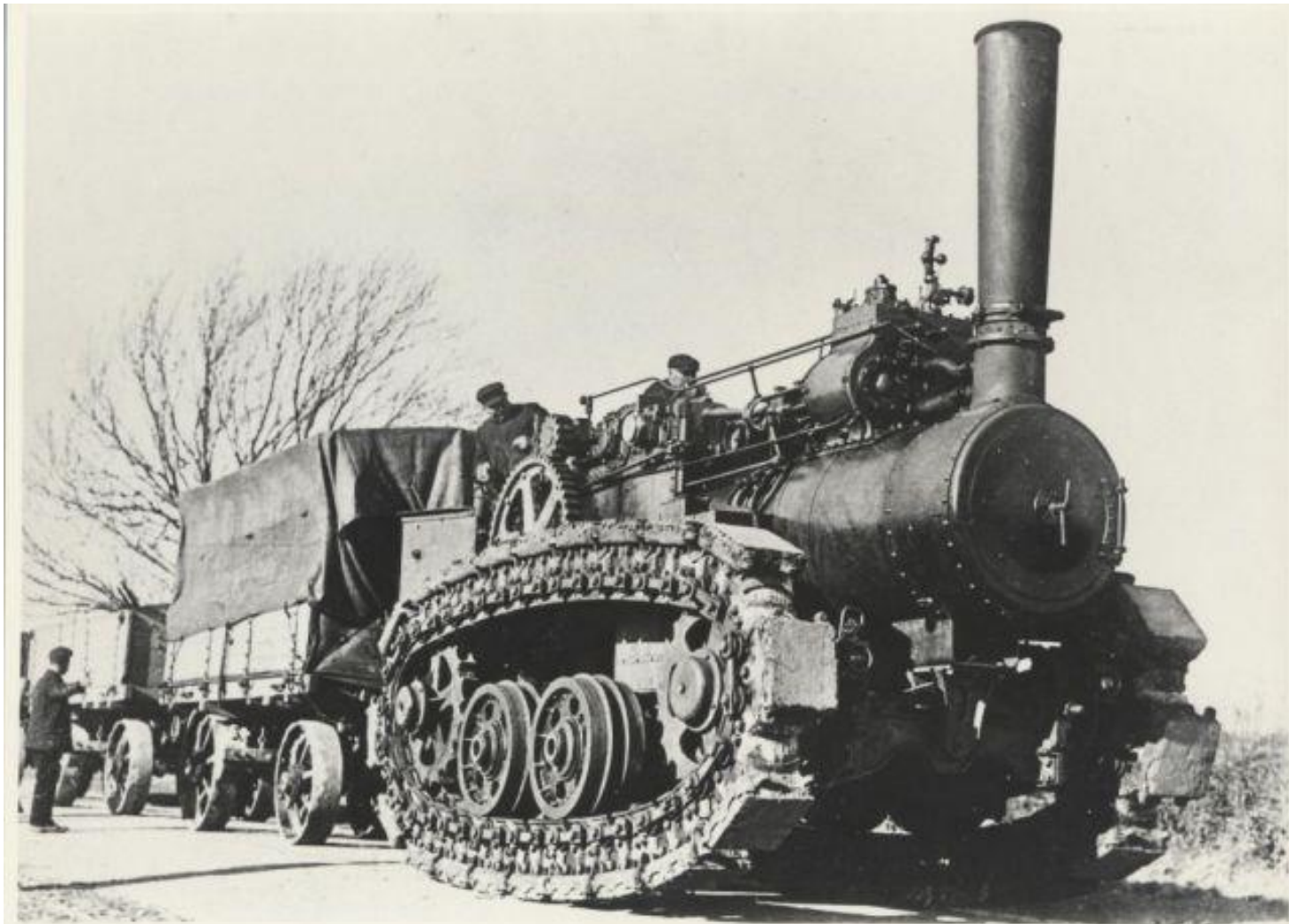
Одним из наиболее распространённых в технике рабочих тел является водяной пар.

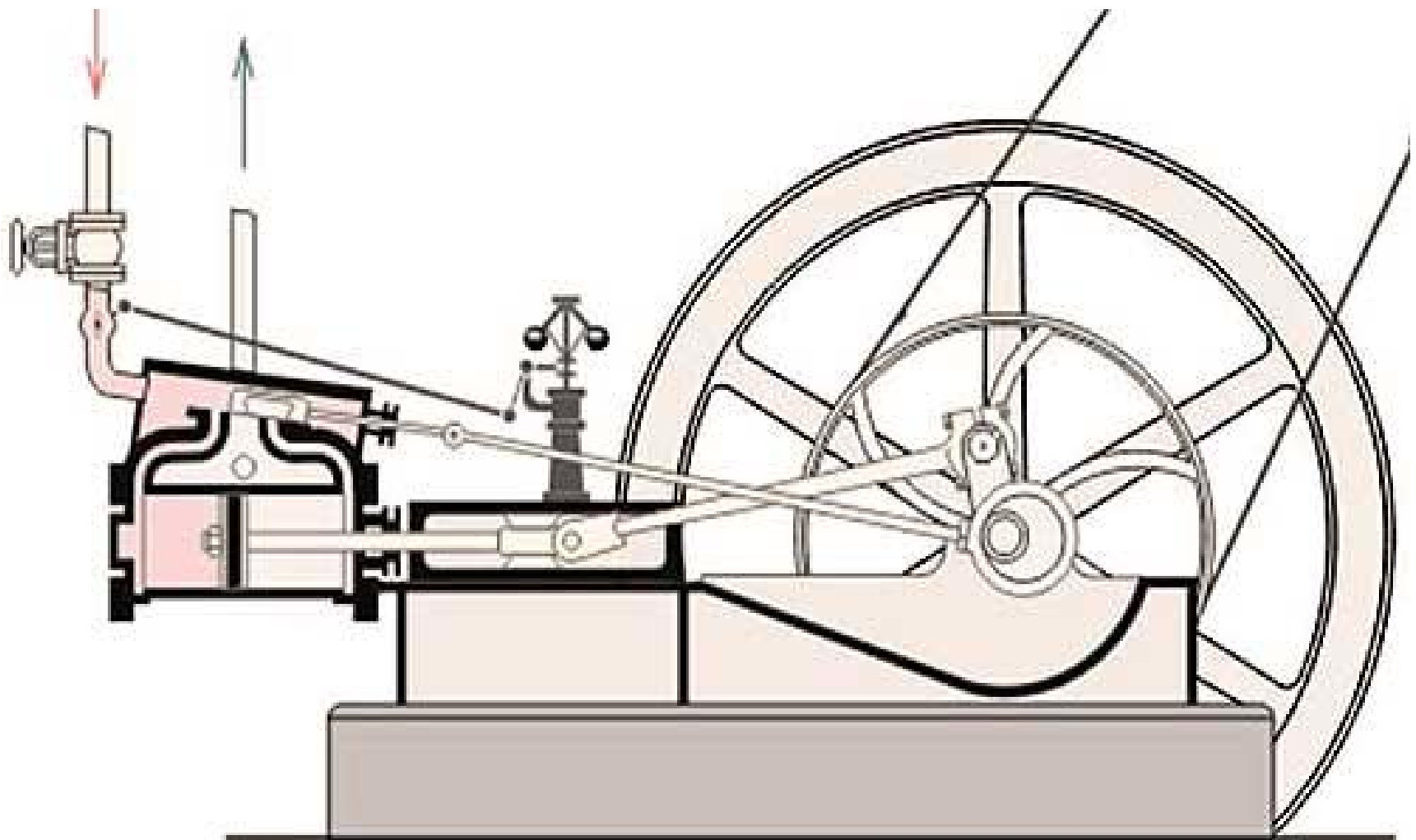
Применение пара

Паровая машина — тепловой двигатель, преобразующий энергию нагретого пара в механическую работу.

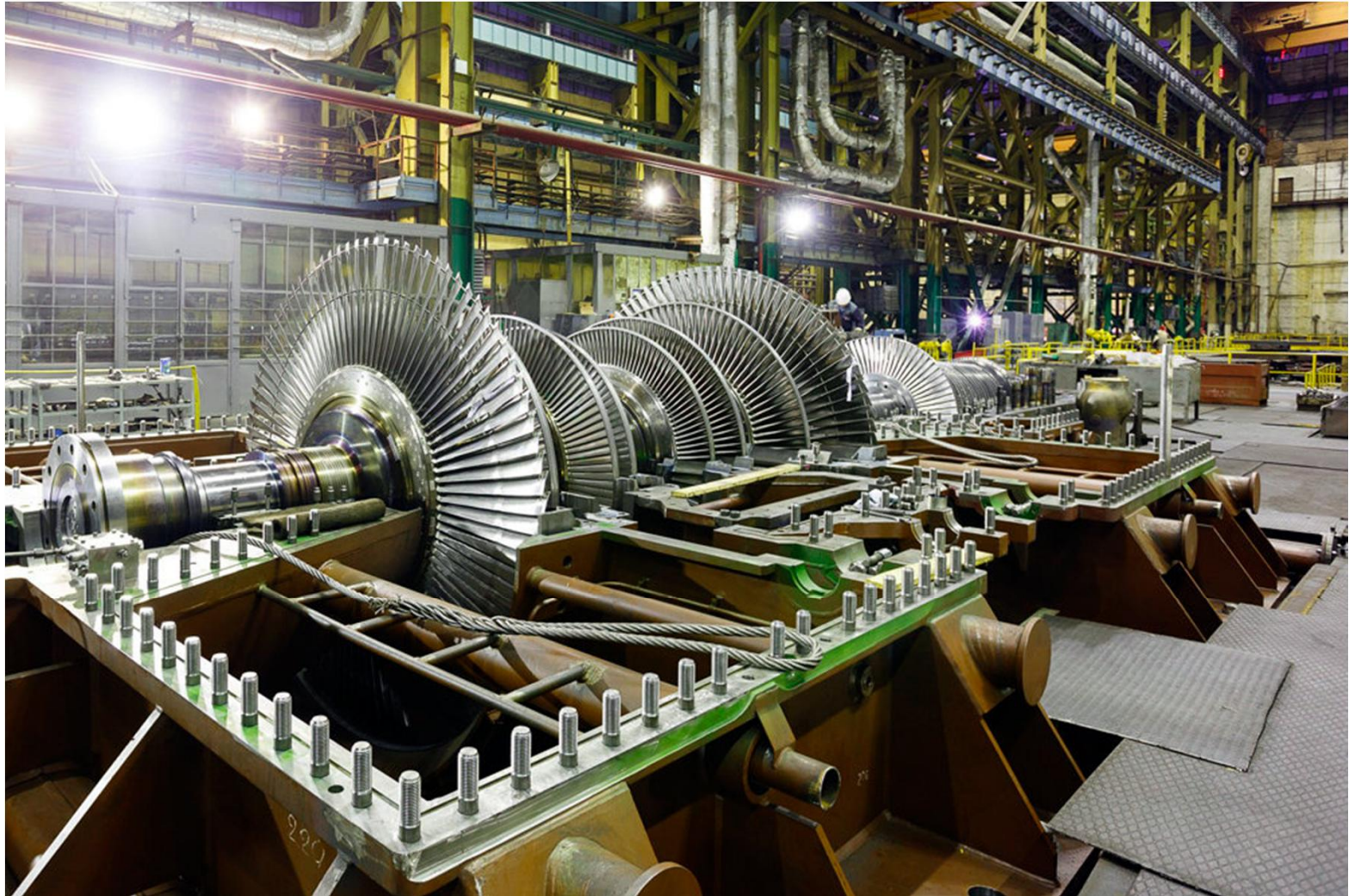


Паровой гусеничный тягач Хорнсби.





Паровые турбины



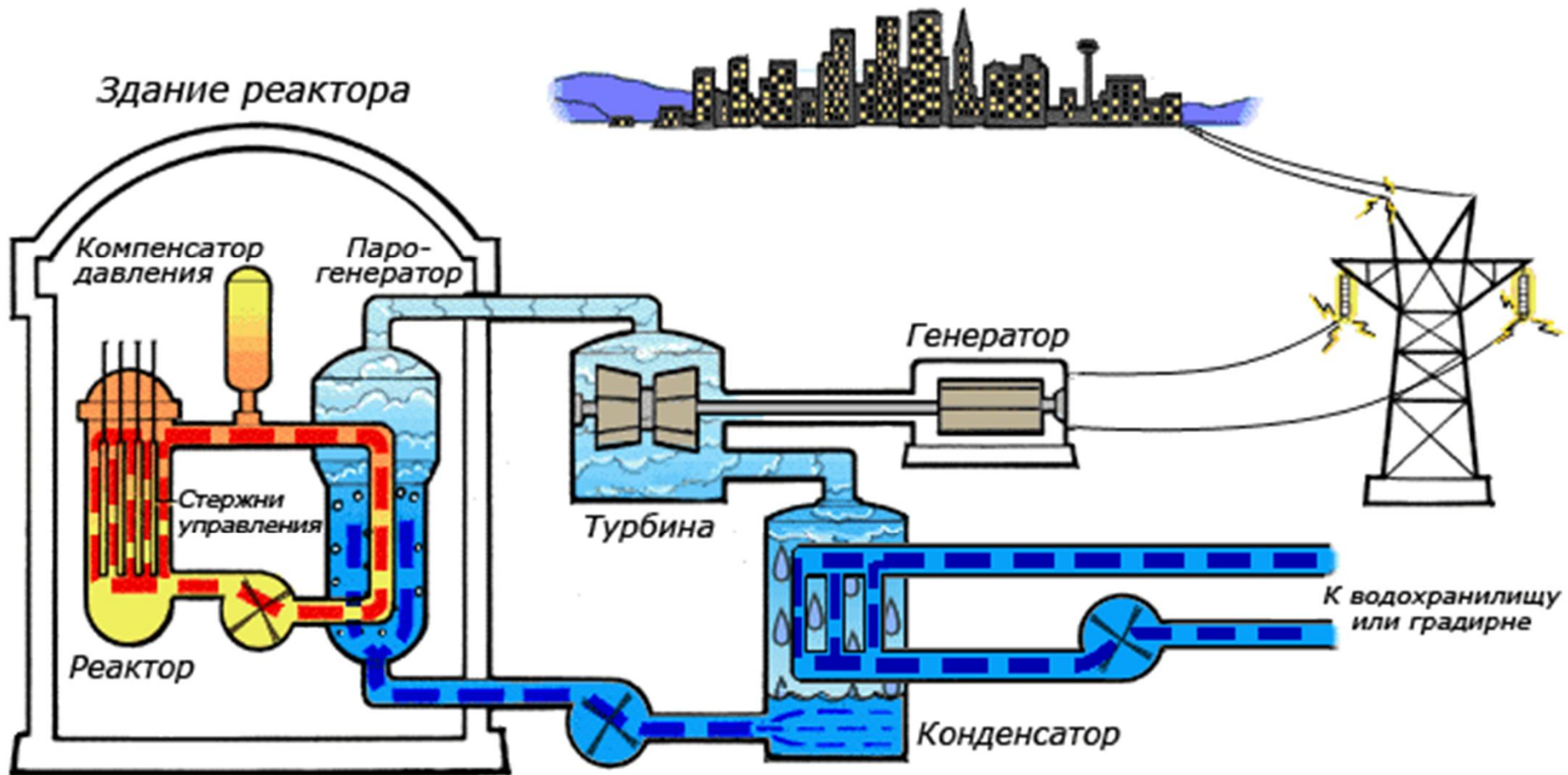
Тепловые электростанции (ТЭС)



Атомные электростанции (АЭС)



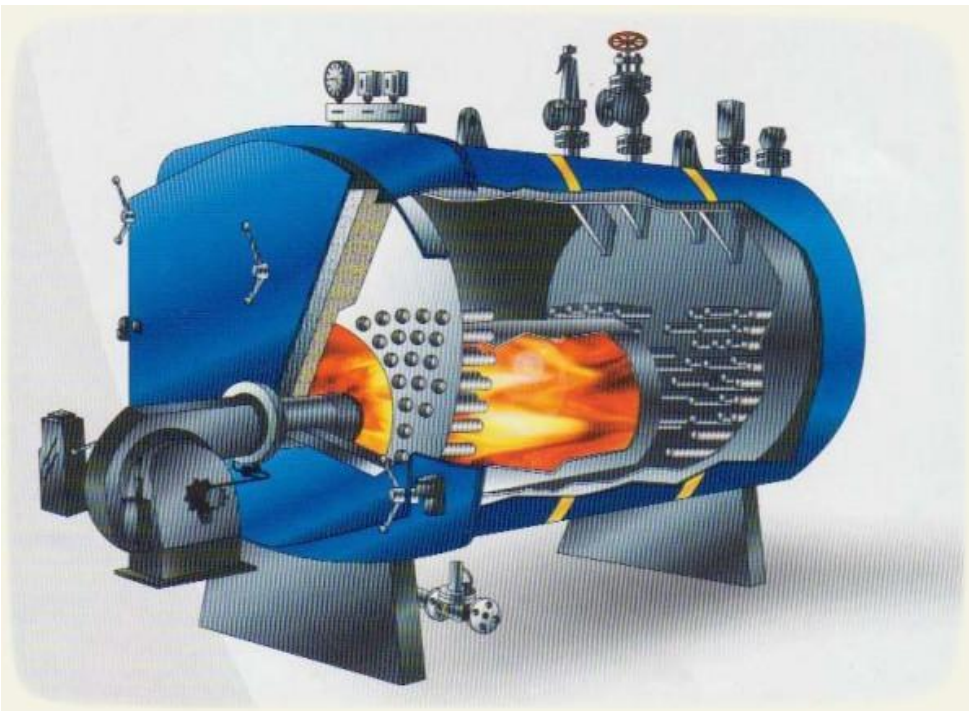
Атомные электростанции (АЭС)



Геотермические электростанции (ГеоЭС)



Паровые котлы




Домашний автоклав для консервирования




Медицинский автоклав





Паром называют газообразное состояние вещества в условиях, когда газовая фаза находится в равновесии с жидкой или твёрдой фазами этого же вещества.


Переход вещества из одного состояния в другое называется *фазовым переходом*.



Процесс фазового перехода вещества из жидкой фазы в газообразную называется *парообразованием*.

Парообразование, происходящее с поверхности жидкости называется *испарением*.

Парообразование, происходящее во всем объёме жидкости называется *кипением*.



Интенсивность испарения зависит от температуры, чем выше температура жидкости, тем быстрее происходит её испарение.

В результате испарения температура жидкости снижается.

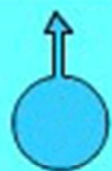


Процесс, обратный парообразованию, называется *конденсацией*, которая также протекает при постоянной температуре.

Жидкость, образующаяся при конденсации пара, называется *конденсатом*.

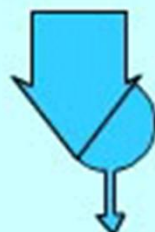
воздух


конденсация



жидкость

парообразование





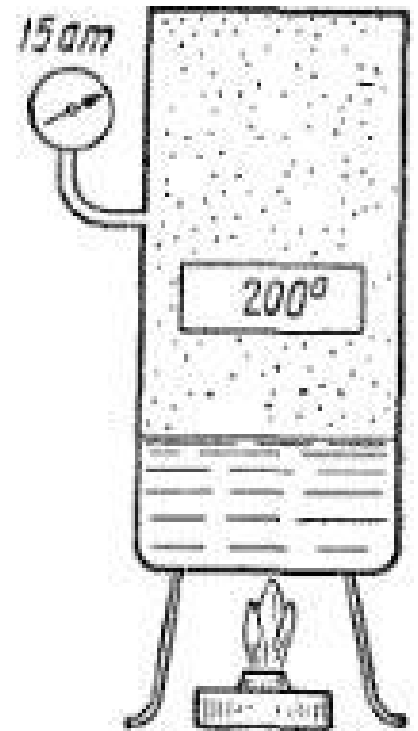
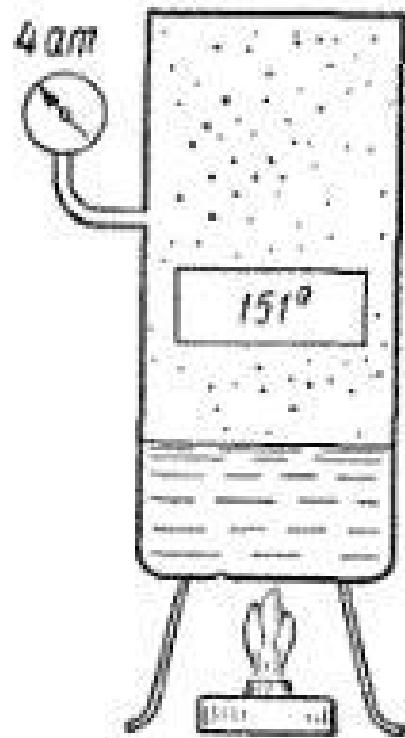
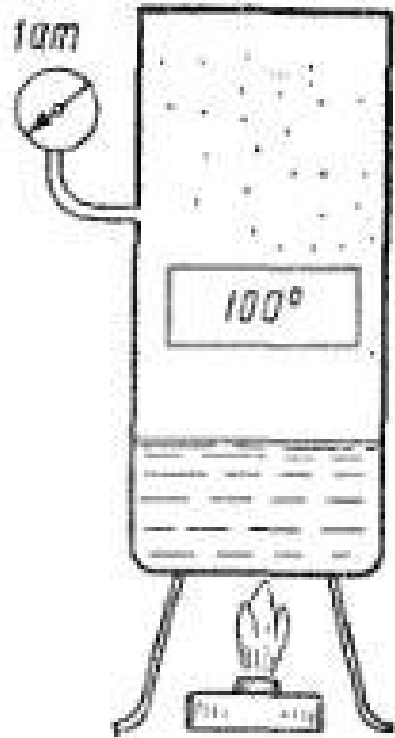
При определённой температуре, зависящей от природы жидкости и давления, парообразование начинается во всей массе жидкости и называется *кипением*.

После начала кипения температура жидкости остается постоянной до испарения последней её капли.

Температура кипения в теплотехнике называется *температурой насыщения* и обозначается t_n .

Давление, соответствующее температуре насыщения, называется *давлением насыщения* и обозначается p_n .

Чем выше давление, при котором происходит кипение жидкости, тем выше температура её насыщения и наоборот.





Процесс перехода вещества из твердого состояния в газообразное, минуя жидкую фазу, называется *сублимацией*.


Обратный процесс перехода вещества из газообразного состояния в твердое называется *десублимацией*.



Сублимация и десублимация

Если процесс парообразования происходит в неограниченном пространстве, то со временем вся жидкость превратится в пар.






Если же парообразование происходит в закрытом сосуде, то одновременно протекают два процесса – парообразование и конденсация.

Пар, соприкасающийся с жидкостью и находящийся с ней в термодинамическом равновесии, называется *насыщенным*.

Пар, получаемый при неполном испарении жидкости, называется ***влажным насыщенным паром.***

Он представляет собой смесь сухого насыщенного пара с капельками жидкости.

Состояние влажного насыщенного пара характеризуется двумя параметрами: давлением p_H (или температурой насыщения t_H) и ***степенью сухости пара x .***



Степень сухости пара представляет собой массовую долю сухого пара во влажном паре

$$x = \frac{m_{\text{СП}}}{m_{\text{ВП}}},$$

где $m_{\text{СП}}$ — масса сухого насыщенного пара во влажном;

$m_{\text{ВП}}$ — масса влажного насыщенного пара.


Массовая доля жидкости во влажном паре называется *степенью влажности*, обозначается *y* и определяется по формуле

$$y = 1 - x.$$

Для кипящей жидкости при температуре насыщения $x = 0$, $y = 1$; для сухого насыщенного пара $x = 1$, $y = 0$.

Насыщенный пар, в котором отсутствуют взвешенные капли жидкости, а температура равна температуре насыщения t_n , соответствующей данному давлению, называется ***сухим насыщенным паром***.

Состояние сухого насыщенного пара определяется любым из параметров – давлением, удельным объёмом или температурой.



Если к сухому насыщенному пару подвести некоторое количество теплоты при постоянном давлении, то температура его будет возрастать, а получаемый в результате пар называется *перегретым*.


Перегретым называется пар, температура которого выше температуры насыщения при данном давлении.

Состояние перегретого пара характеризуется его *степенью перегрева* $t_{\text{пер}}$, которая определяется по формуле

$$t_{\text{пер}} = t_{\text{п}} - t_{\text{н}},$$

где $t_{\text{п}}$ – температура перегретого пара;

$t_{\text{н}}$ – температура насыщения пара при данном давлении.



При изучении процессов, протекающих с водой и водяным паром, вводятся следующие обозначения:

1) все параметры, относящиеся к жидкости при температуре 0° С, обозначаются с индексом «0», т.е. $v_0, \rho_0, u_0, h_0, s_0$;

2) все параметры, относящиеся к жидкости при температуре насыщения обозначаются с одним штрихом – v', ρ', u', h', s' ;

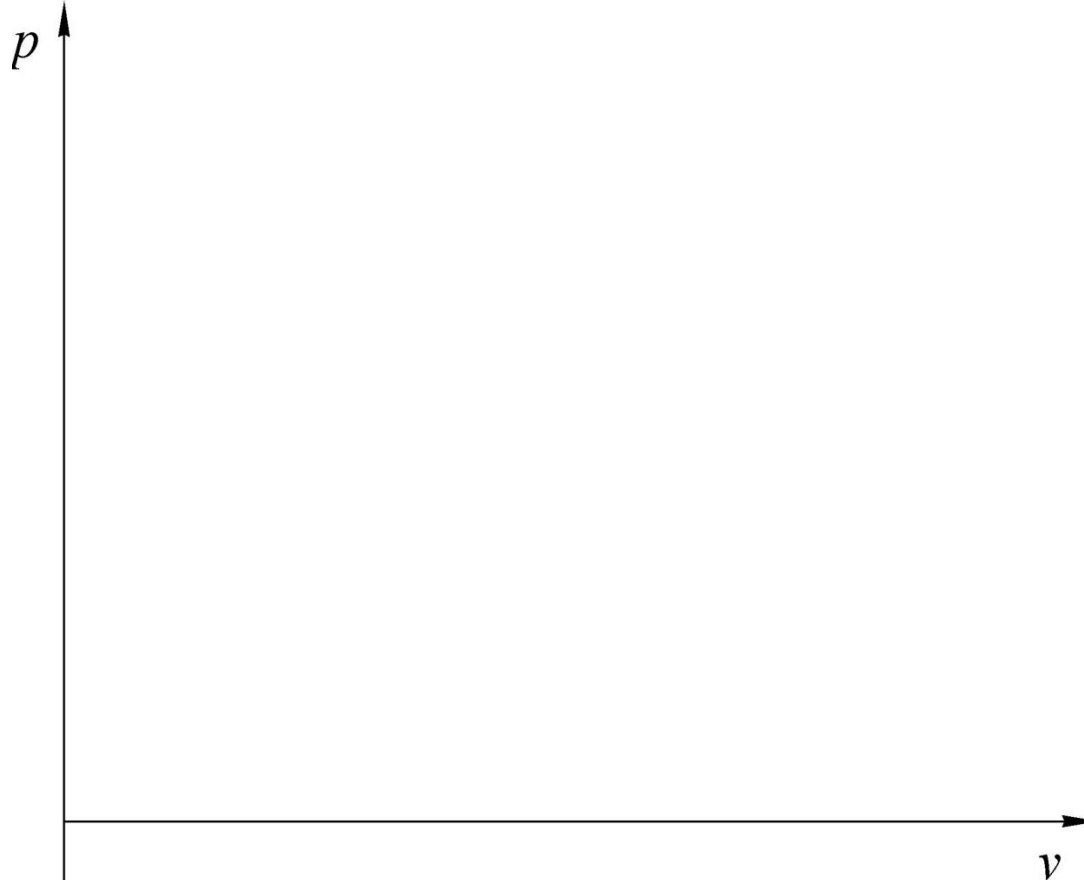
3) все параметры, относящиеся к влажному насыщенному пару, обозначаются с индексом «x» – $v_x, \rho_x, u_x, h_x, s_x$;

4) все параметры, относящиеся к сухому насыщенному пару, обозначаются с двумя штрихами – $v'', \rho'', u'', h'', s''$;

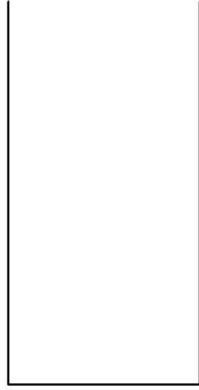
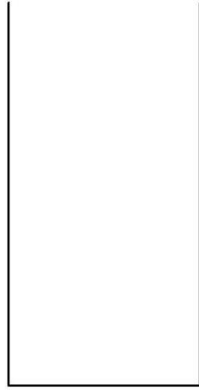
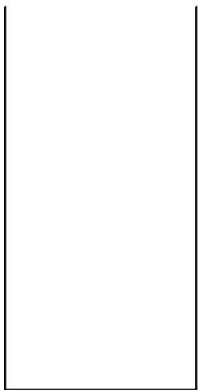
5) все параметры, относящиеся к перегретому пару, обозначаются с индексом «п» – $v_{п}, \rho_{п},$

$u_{п}, h_{п}, s_{п}$.

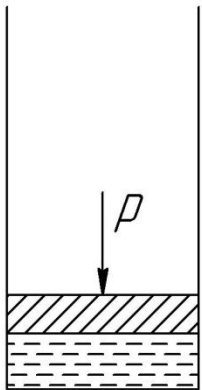
Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме



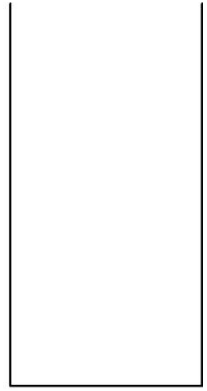
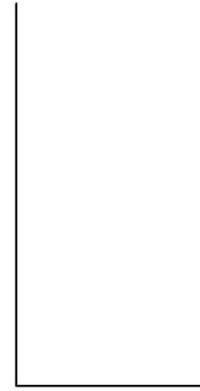
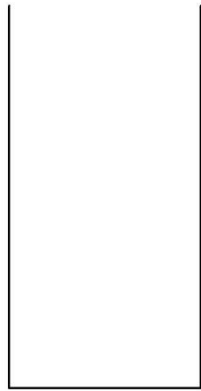
Процесс парообразования в p - v -диаграмме



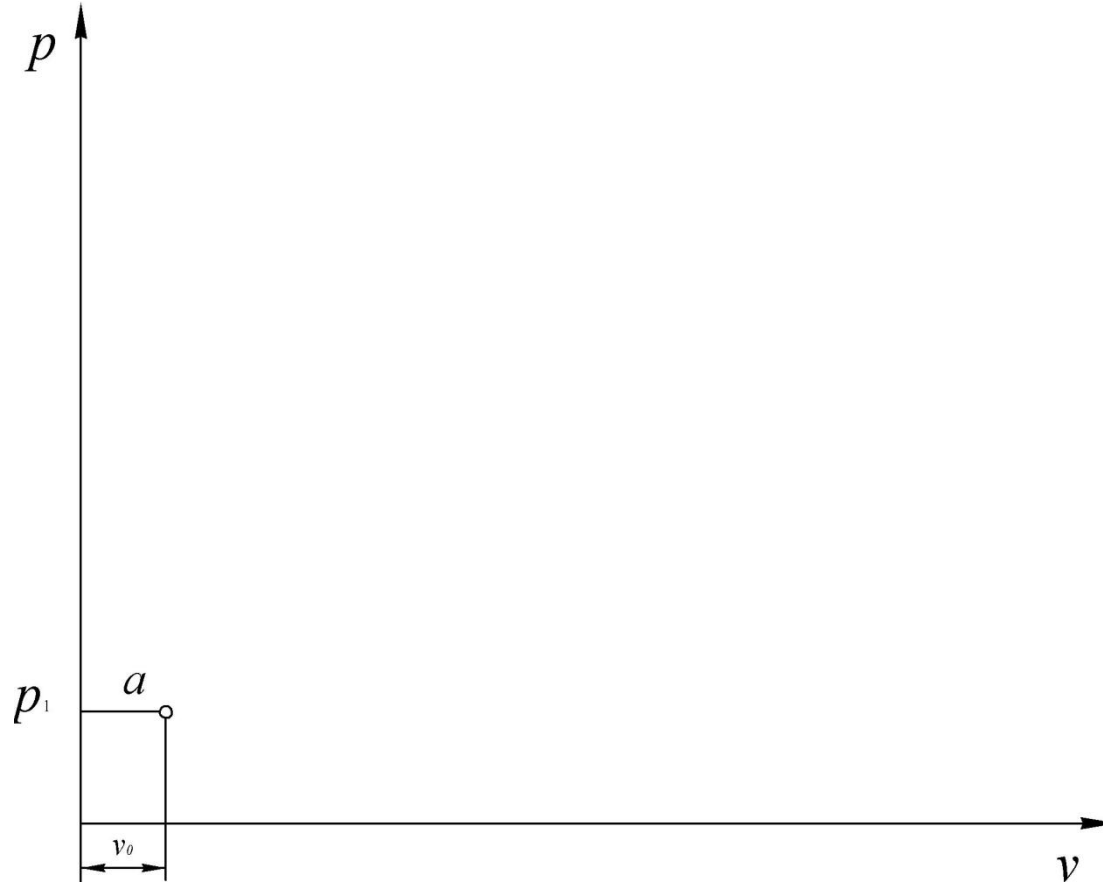
Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме



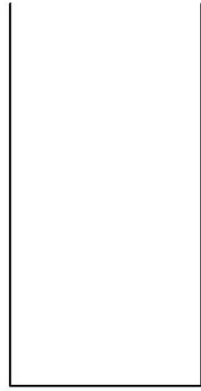
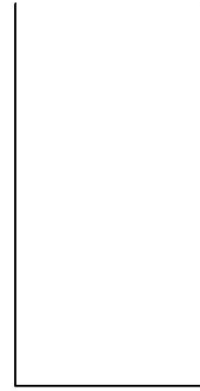
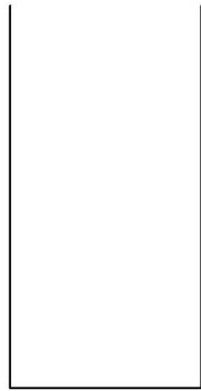
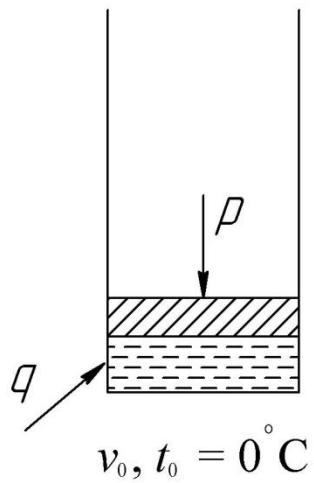
$$\nu_0, t_0 = 0^\circ \text{C}$$



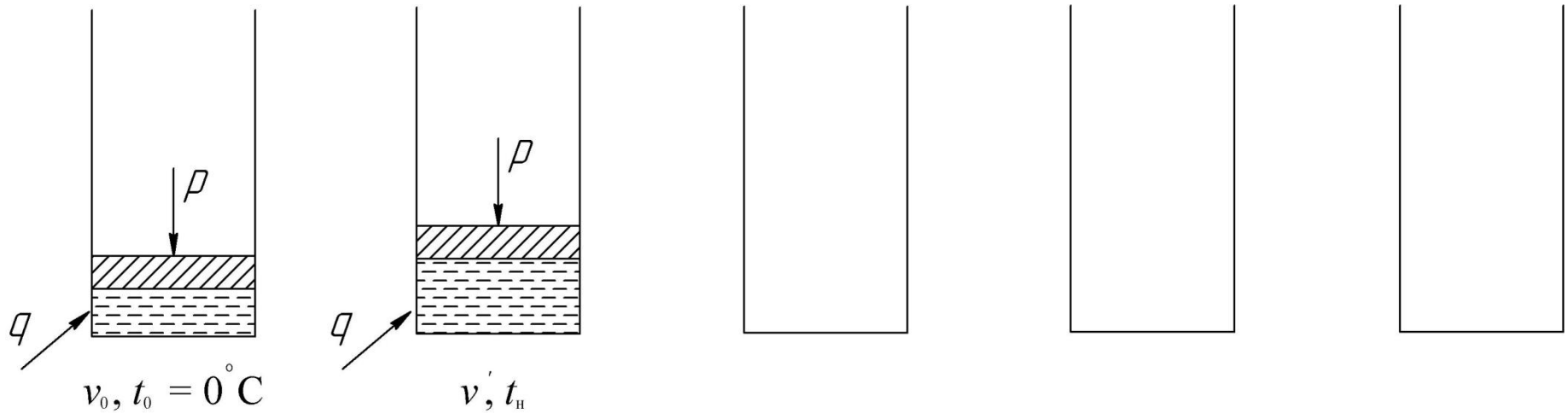
Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме



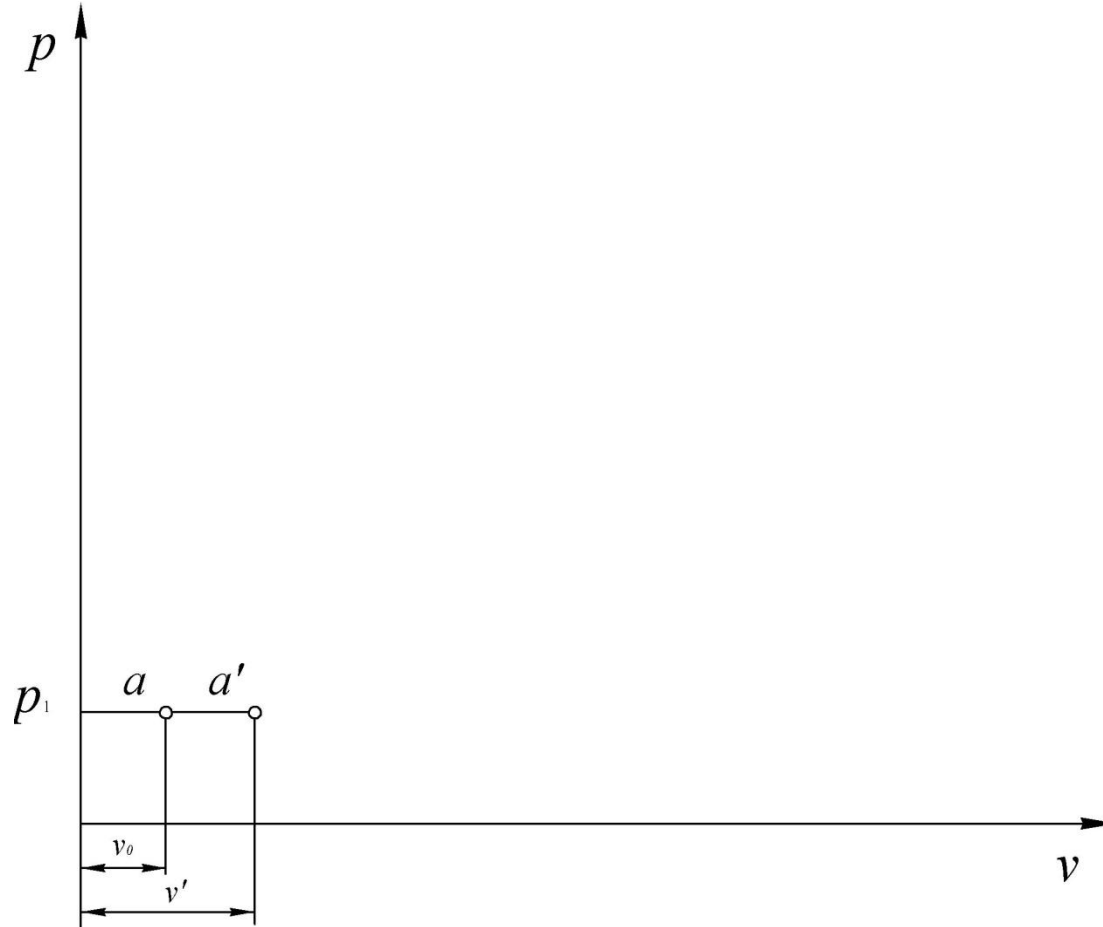
Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме



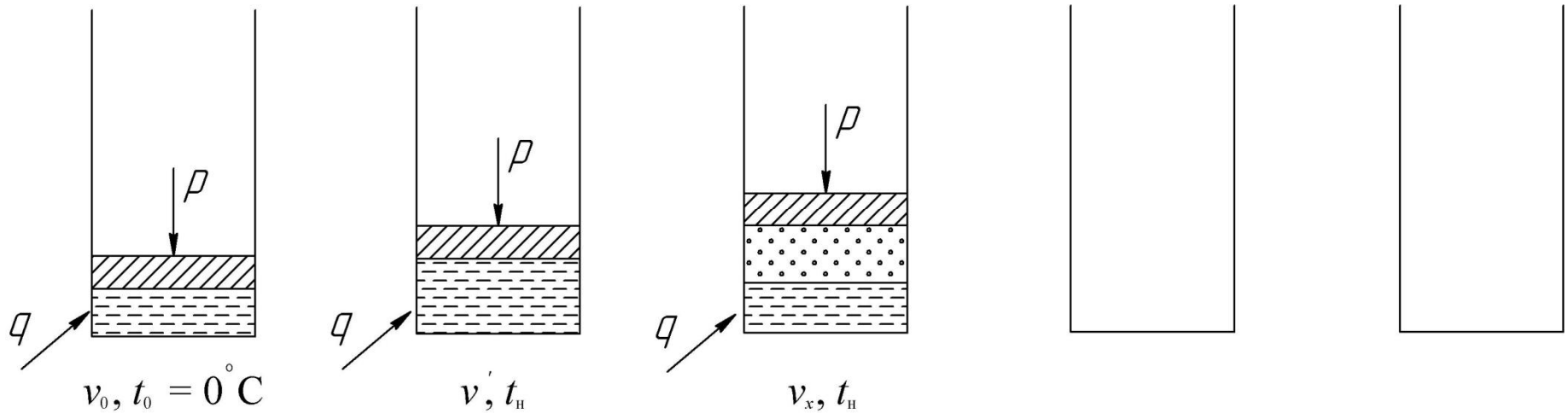
Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме



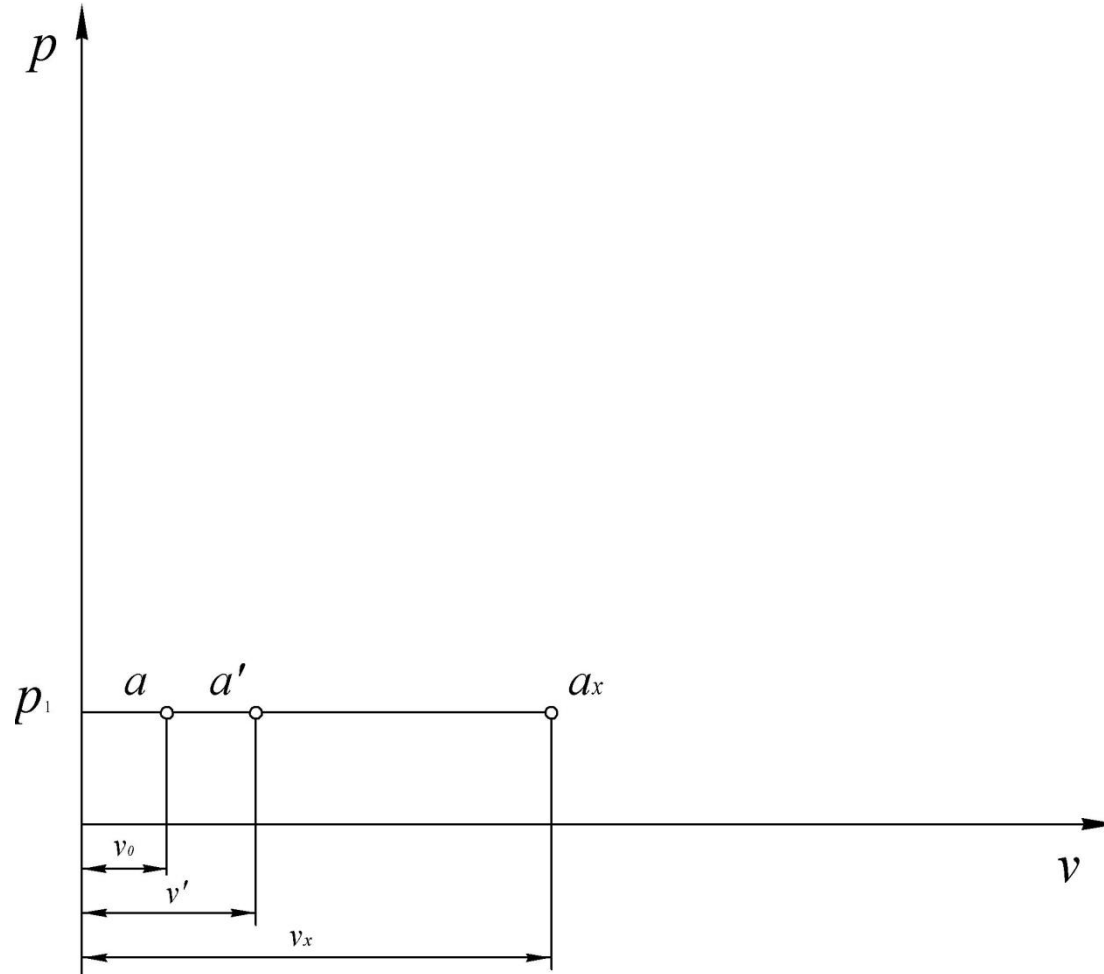
Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме



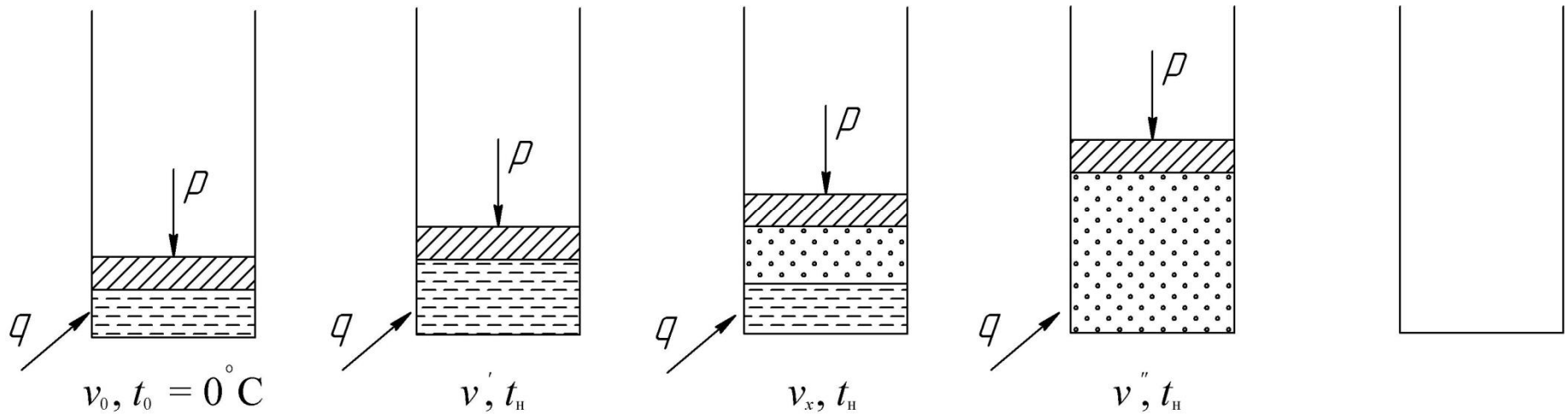
Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме



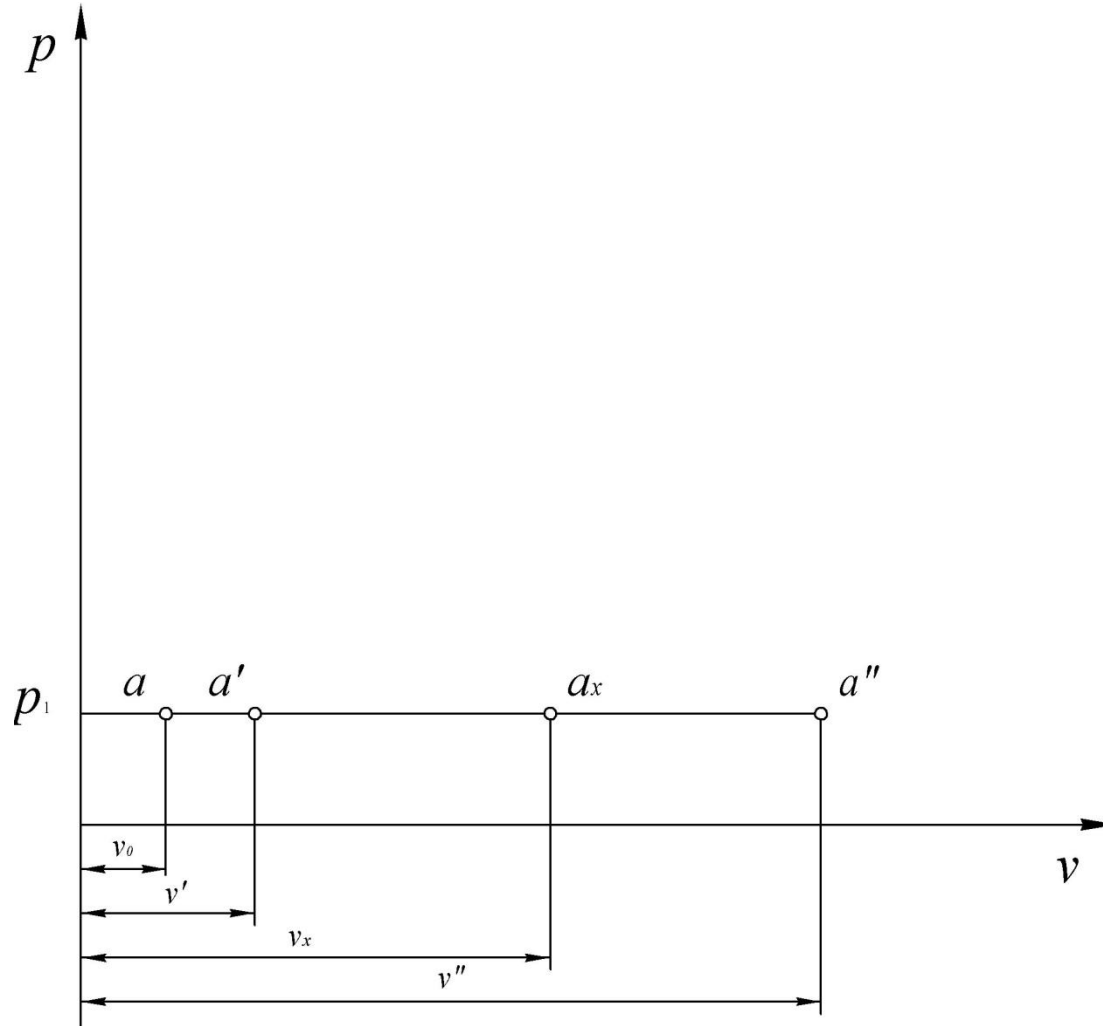
Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме



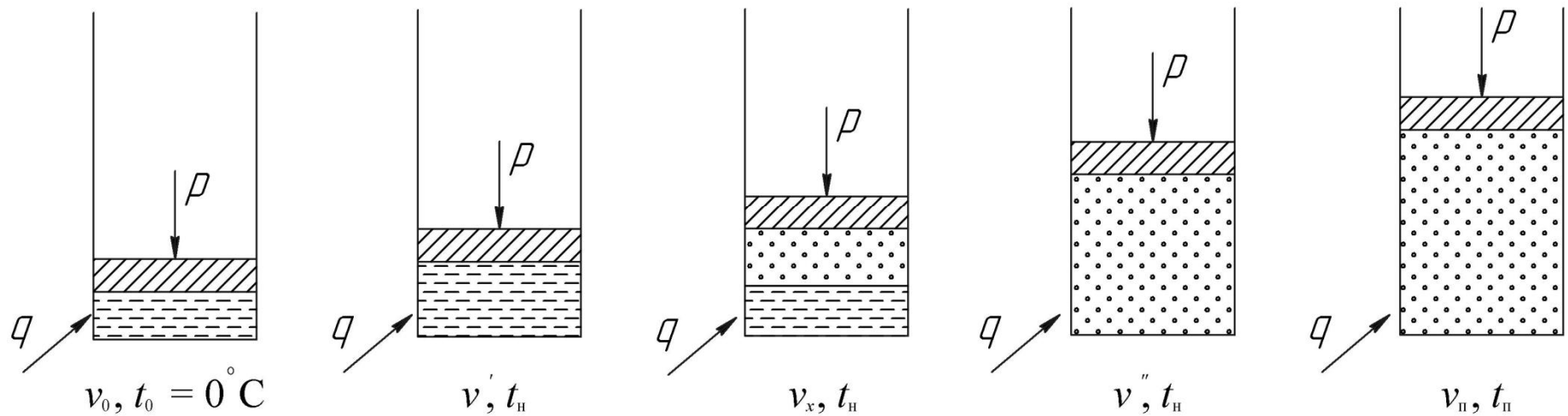
Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме



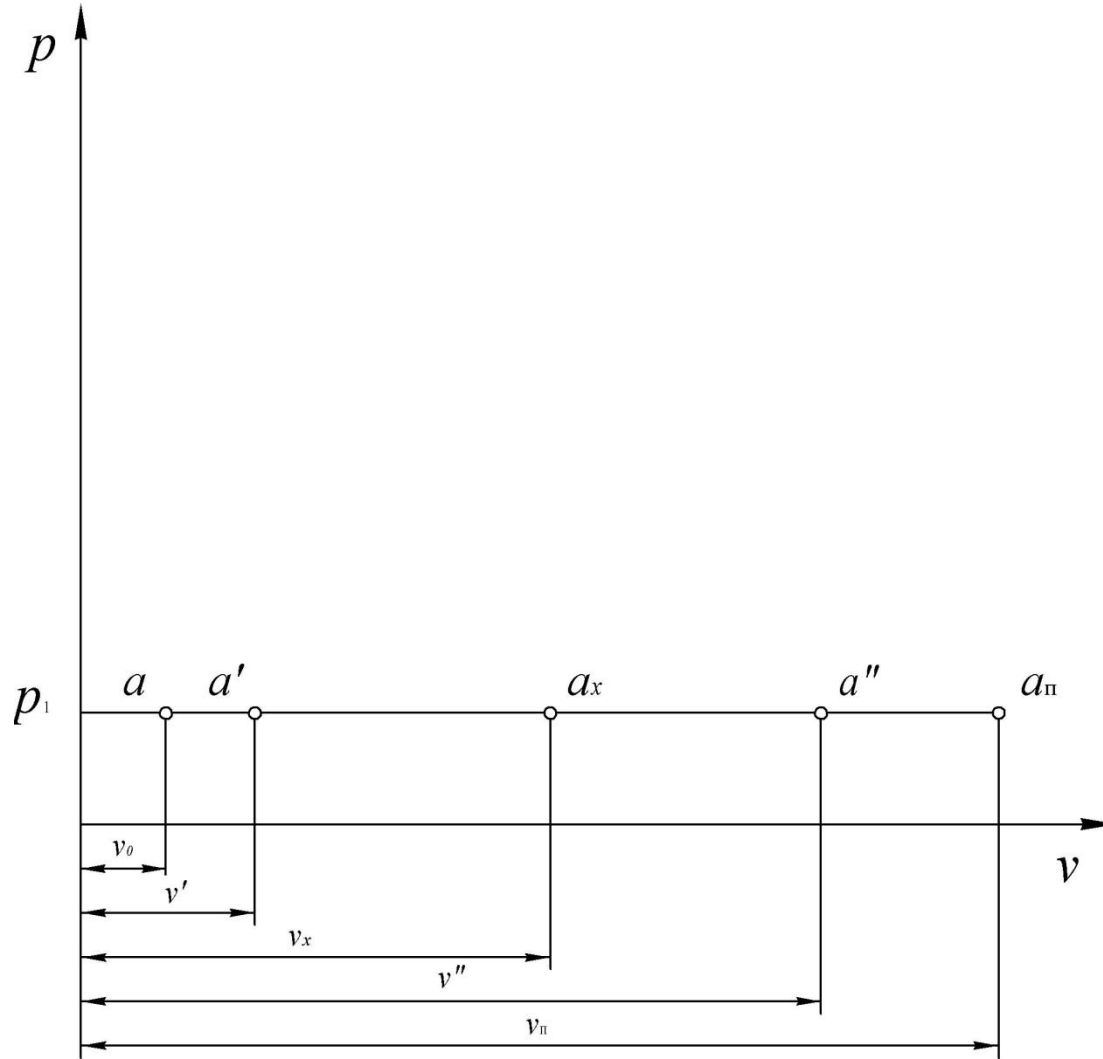
Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме



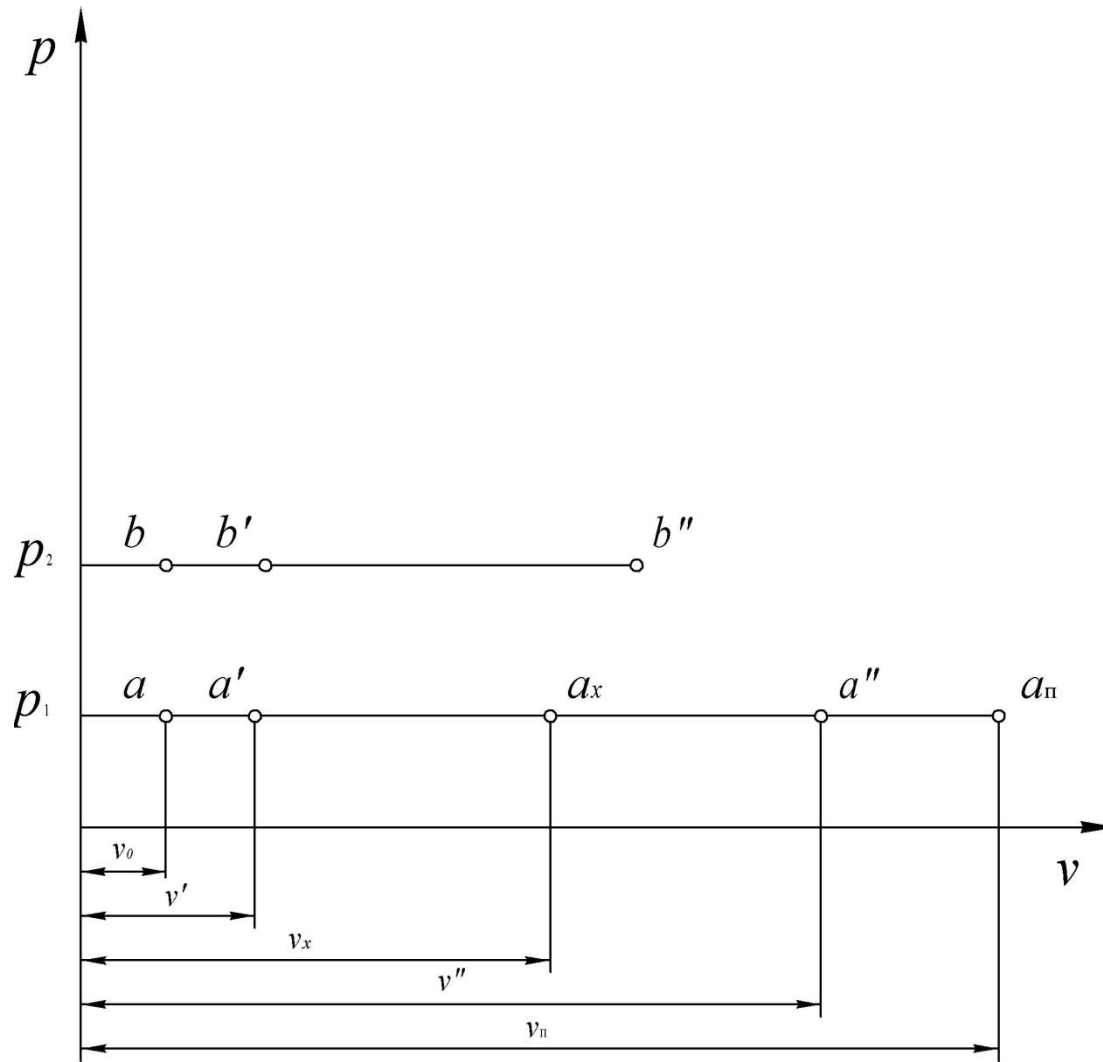
Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме



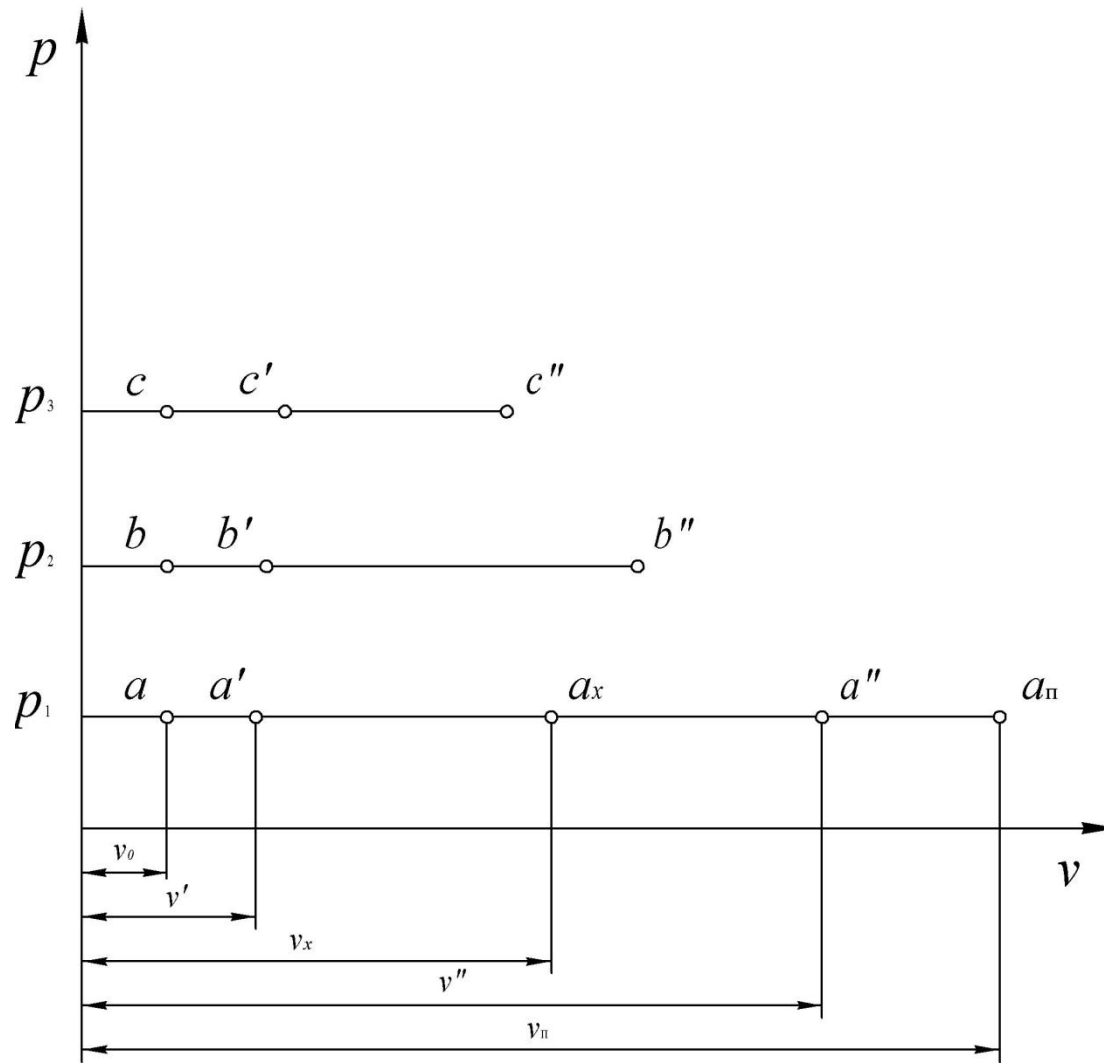
Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме



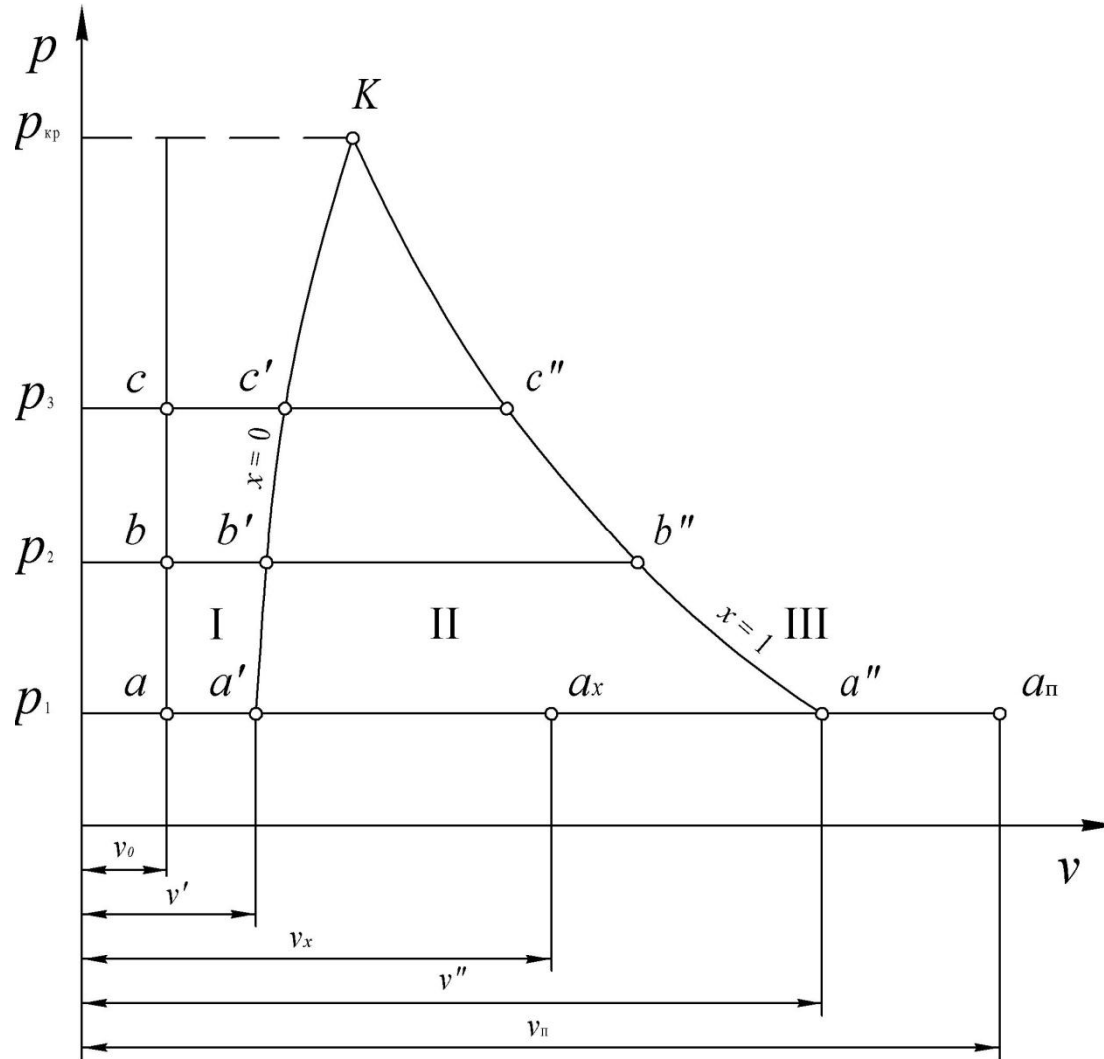
Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме



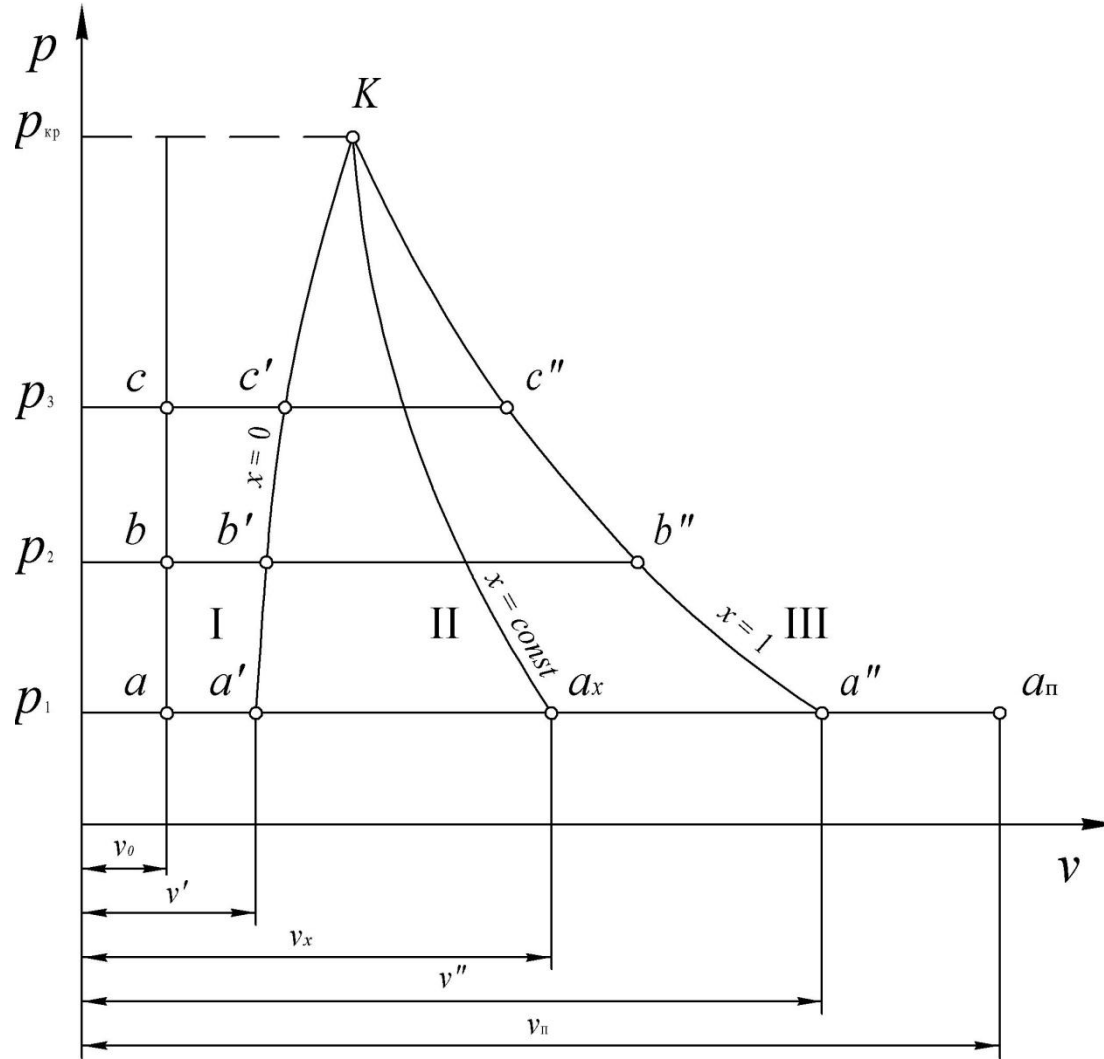
Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме



Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме




Процесс парообразования в $p\nu$ -диаграмме



Линия $a-b-c$ – **нулевая изотерма** – характеризует состояние воды при температуре 0°C и различных давлениях.

Линия $a'-b'-c'-K$, на которой находится жидкость при температуре насыщения, называется **нижней пограничной кривой**.


Линия $a''-b''-c''-K$, на которой находится сухой насыщенный пар, называется **верхней пограничной кривой**.




В области I находится жидкость с температурой от 0° С до температуры насыщения при различных давлениях.

В области II находится влажный насыщенный пар с возрастающей слева направо степенью сухости.

В области III находится перегретый пар с возрастающей слева направо степенью перегрева.



Точка пересечения пограничных кривых K называется ***критической точкой***, а параметры вещества в этой точке – ***критическими***.



В критической точке плотность жидкости и её насыщенного пара становятся равны, а поверхностное натяжение жидкости и граница раздела фаз жидкость-пар исчезают.

Для воды критические параметры имеют следующие значения:

$$p_{\text{кр}} = 22,115 \text{ МПа}; \quad t_{\text{кр}} = 374,15^\circ \text{ С};$$

$$v_{\text{кр}} = 0,00326 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Таблица. Критические параметры некоторых наиболее применимых веществ

Вещество	Критические параметры состояния				
	температура		давление	удельный объём	плотность
	$T_{кр}, K$	$t_{кр}, ^\circ C$	$p_{кр}, MPa$	$v_{кр} \cdot 10^5, m^3/kg$	$\rho_{кр}, kg/m^3$
Азот (N ₂)	126,1	-147,1	3,90	322	311
Аммиак (NH ₃)	405,6	132,4	11,35	311	322
Ацетон (C ₃ H ₆ O)	508,7	235,5	4,75	360	278
Водород (H ₂)	33,2	-239,9	1,30	3226	31,0
Воздух	132,5	-140,7	3,77	286	350
Гелий (He)	5,25	-267,9	0,23	1443	69,3
Диоксид серы (SO ₂)	430,7	157,5	7,88	191	524
Диоксид углерода (CO ₂)	304,3	31,2	7,38	214	468
Кислород (O ₂)	154,6	-118,6	5,04	233	430
Метан (CH ₄)	190,6	-82,4	4,63	617	162
Метанол (CH ₃ OH)	513,3	240,1	8,09	368	272
Пропан (C ₃ H ₈)	369,9	96,8	4,25	461	217
Пропилен (C ₃ H ₆)	364,9	91,7	4,60	431	232
Сероводород (H ₂ S)	373,6	100,4	9,01	287	349
Хлор (Cl)	416,9	143,8	7,98	175	573
Этан (C ₂ H ₆)	305,5	32,3	4,87	493	203
Этанол (C ₂ H ₅ OH)	516,3	243,1	6,40	362	276
Этилен (C ₂ H ₄)	282,4	9,2	5,04	465	215
Эфир (C ₄ H ₁₀ O)	466,6	193,4	3,61	385	260

Фазовая диаграмма воды

