

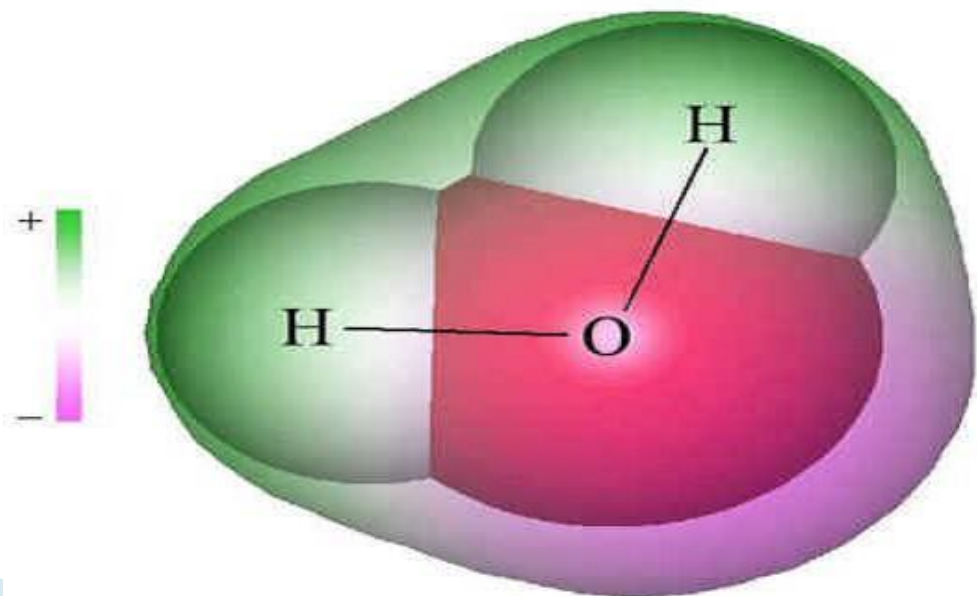
# ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА



## *Тема 16: Общие свойства жидкостей и паров*

# План

- Основные параметры состояния жидкости и пара
- Пограничные кривые
- Критическая температура
- Домашние задание

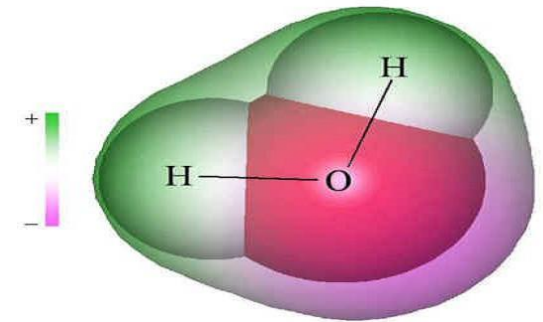


# Основные параметры состояния жидкости и пара

В теплотехнике и хладотехнике используются различные жидкости и их пары:

- аммиак ( $\text{NH}_3$ );
- углекислота ( $\text{CO}_2$ );
- фреоны и многие другие...

Но наиболее часто – *вода и водянии пар.*



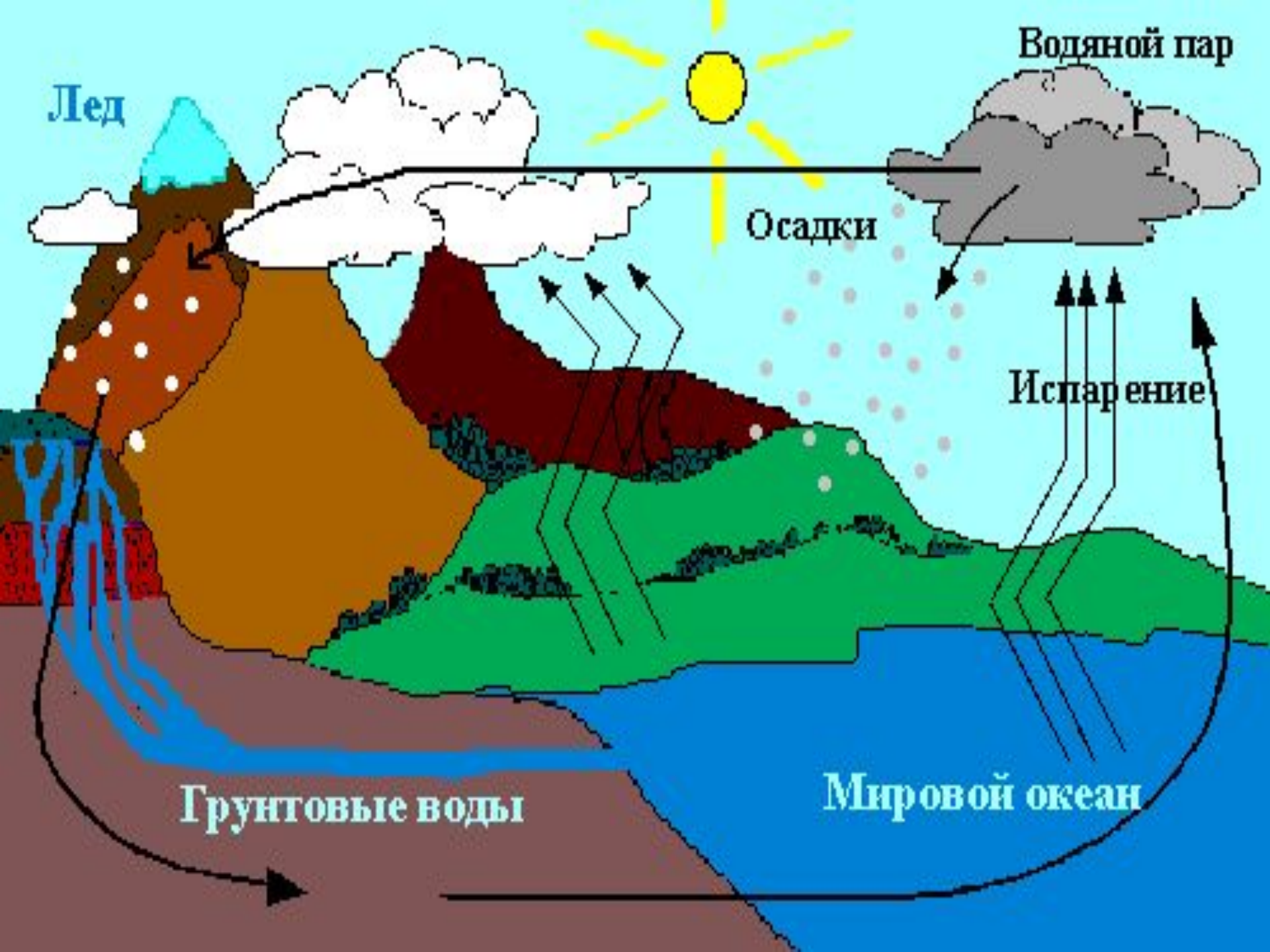
Пар можно получить **двумя способами:**

- при испарении
- при кипении

# Испарение

В процессе испарения молекулы жидкости у её поверхности, имеющие большую скорость, чем другие молекулы, преодолевают силы молекулярного сцепления и вылетают в окружающее пространство.

Чем выше температура жидкости, тем более интенсивно происходит испарение.



# Кипение

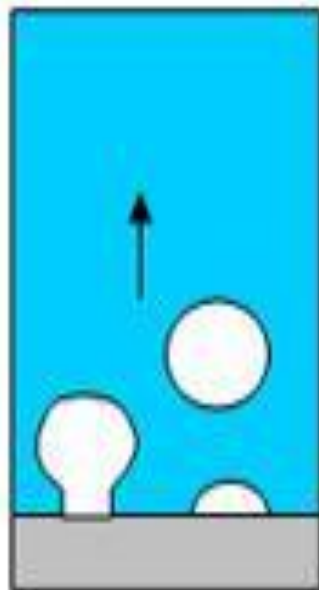
При кипении пар образуется во всей массе жидкости и, имея меньшую плотность, чем жидкость, устремляется вверх, соединяясь при этом с другими частицами пара и образуя, таким образом, **клубки**.

Такие клубки, достигая поверхности жидкости, преодолевают силы поверхностного натяжения и вылетают в окружающее пространство.

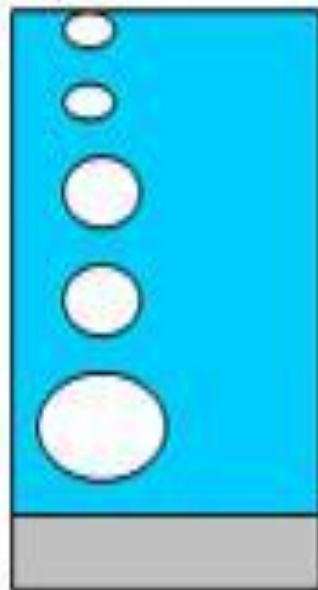




А



Б)



В)

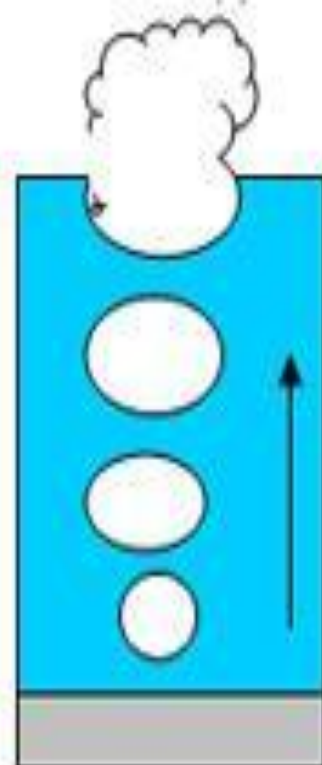


Рис.4







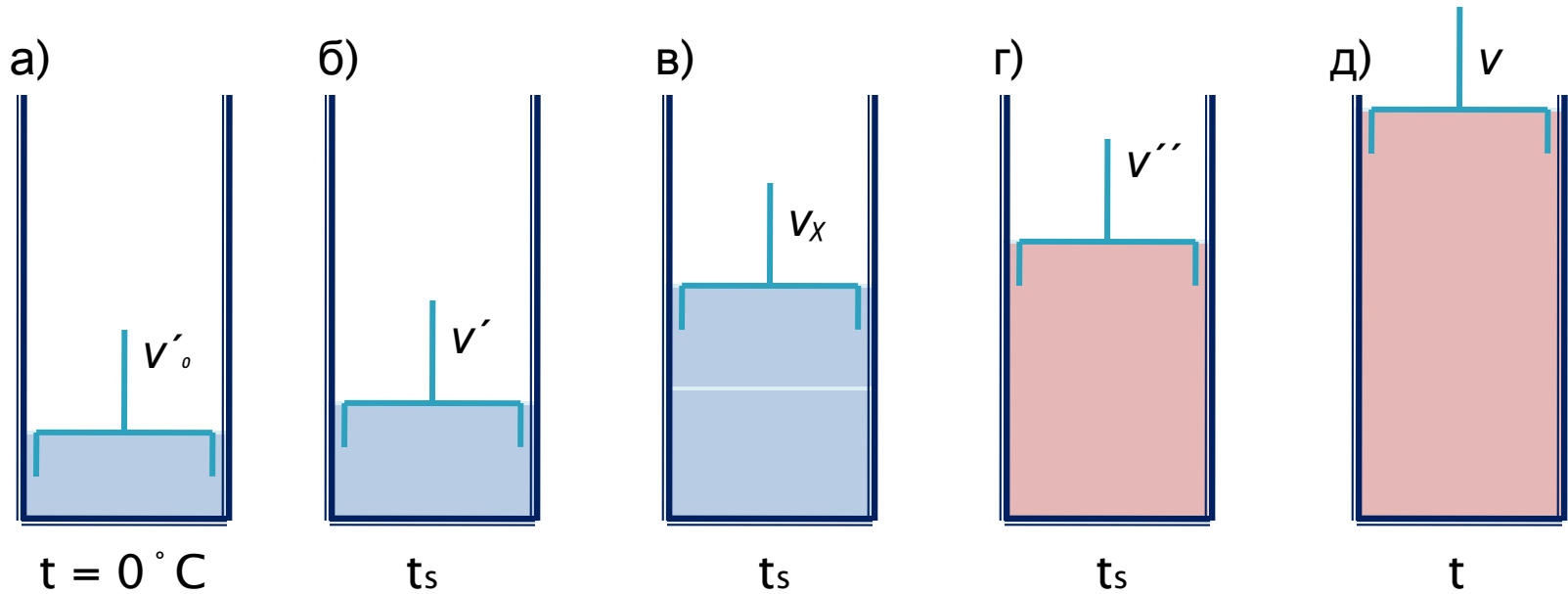
Процесс кипения может происходить лишь при вполне определенной для данного давления температуре жидкости, называемой **температурой кипения** и обозначается  **$t_s$** .

В практических условиях пар обычно получают при постоянном давлении (P-Const).

Такой процесс и рассмотрим ниже.

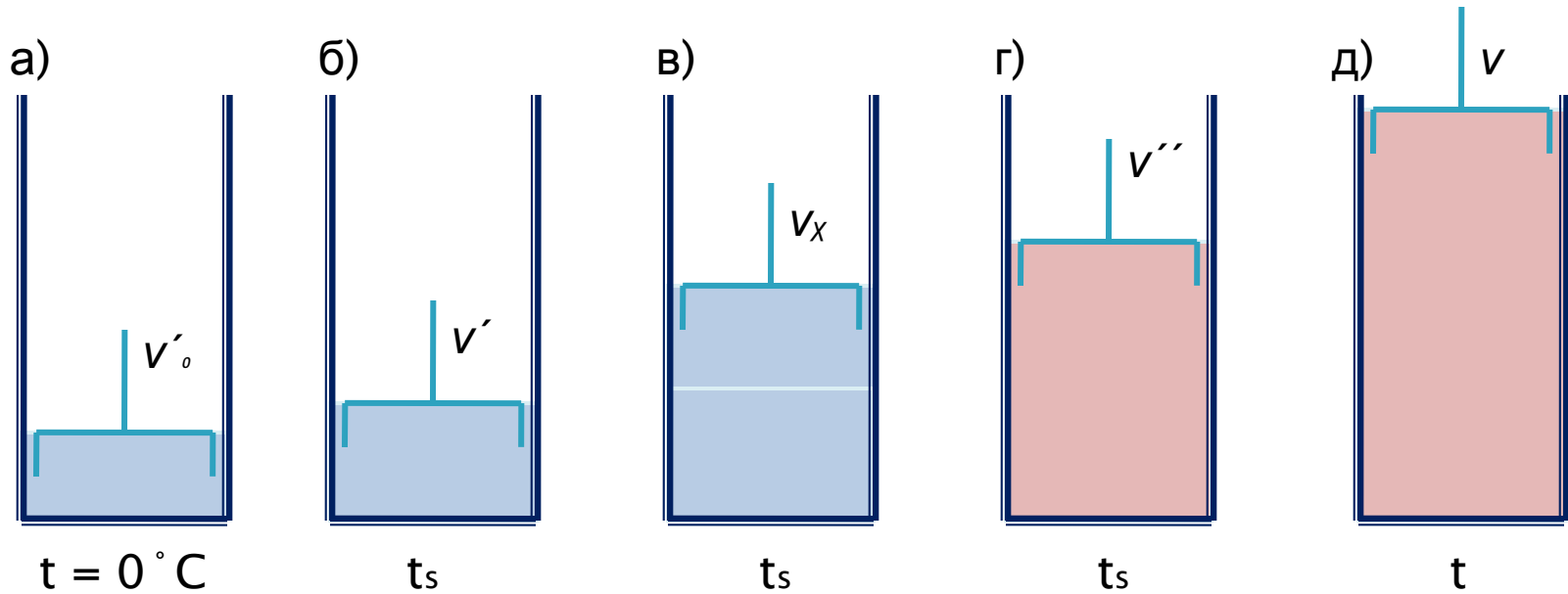


# Процесс получения пара при постоянном давлении



Допустим, что жидкость массой 1 кг при  $0^\circ \text{C}$  заключена в цилиндре с подвижным поршнем, нагруженным постоянным поршнем, создающим давлением  $P$  (рис.а).

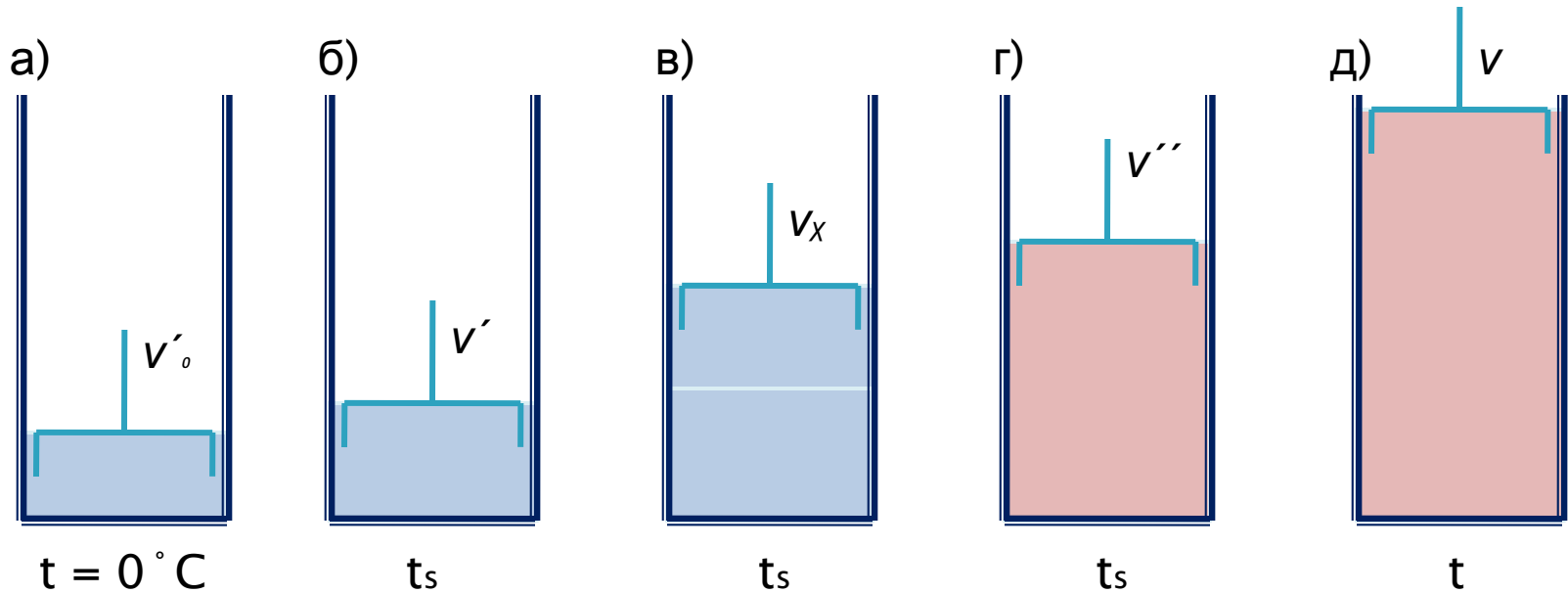
# Процесс получения пара при постоянном давлении



В первой стадии получения пара жидкость подогревается от  $0^\circ \text{C}$  до температуры кипения  $t_s$ , соответствующий данному давлению. Если при температуре  $0^\circ \text{C}$  удельный объем жидкости был  $v'_0$ , то при нагревании её до температуры  $t_s$  он увеличивается до  $v'$  (рис. б).

$v'$  - удельный объём кипящей жидкости.

# Процесс получения пара при постоянном давлении



При дальнейшем нагревании наступает стадия, когда кипящая жидкость постепенно переходит в пар (рис. в).

Пар, образующийся в кипящей жидкости, называется **насыщенным**.

Смесь пара и жидкости (двухфазовая система) называется **влажным насыщенным паром** (рис.в).

В процессе кипения масса пара в цилиндре увеличивается, а жидкости уменьшается до тех пор пока последняя капля её превратится в пар. В этот момент **пар становится сухим насыщенным** (рис.г).

Влажный насыщенный пар характеризуется паросодержанием  $\chi$ .

**Паросодержание** – это отношение массы сухого насыщенного пара к общей массе влажного насыщенного пара, или другими словами, массовой долей пара.

Например, если паросодержание влажного насыщенного пара равно 0,85, то это значит, что в таком паре массой 1 кг содержится пар массой 0,85 кг и жидкость массой 0,15 кг.

В некоторых случаях состояние влажного насыщенного пара характеризуется **влажностью  $\omega$** .

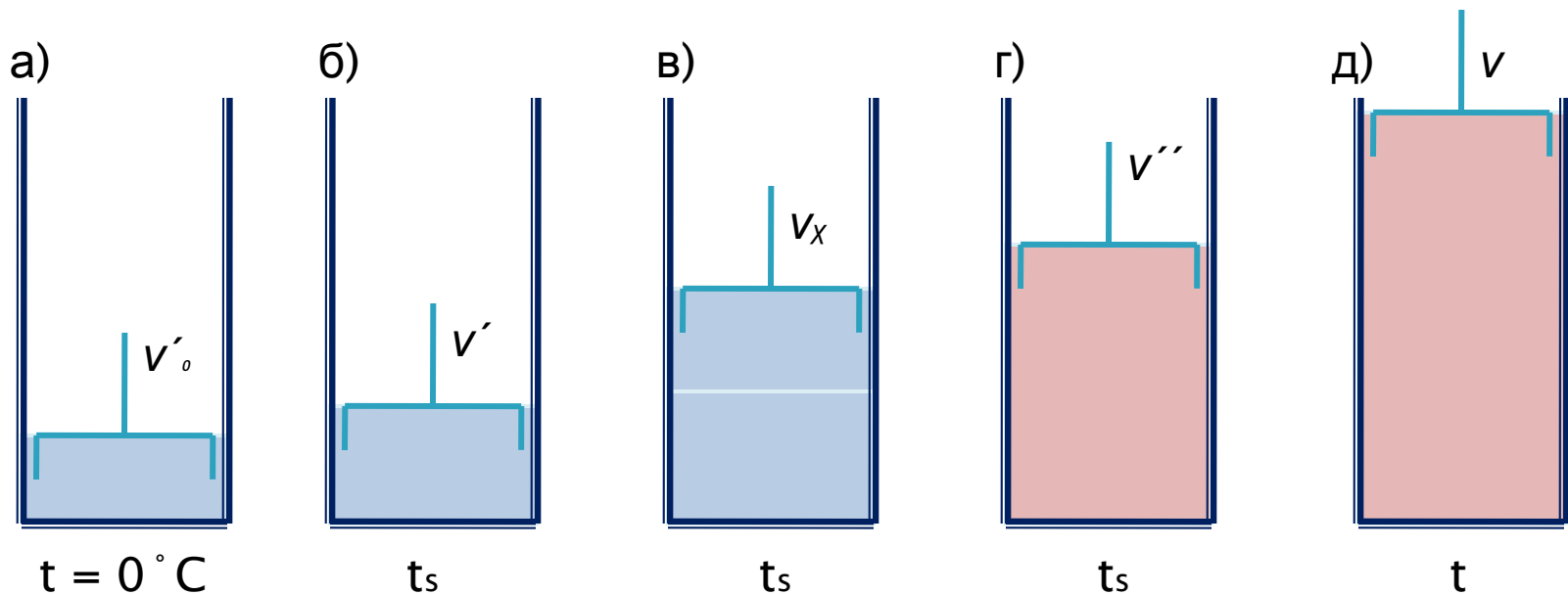
$$\omega = 1 - \chi$$

В приведенном примере влажность пара равно  $\omega = 0,15$ .

Чем пар суше, тем паросодержание его больше:

- для сухого насыщенного пара  $\chi = 1$ ;
- для жидкости  $\chi = 0$ .





Так как удельный объем сухого насыщенного пара  $v''$  больше удельного объема жидкости  $v'$  ( $v'' > v'$ ), из которой он получился, то с увеличением паросодержания удельный объем влажного пара  $v_x$  также увеличивается =>

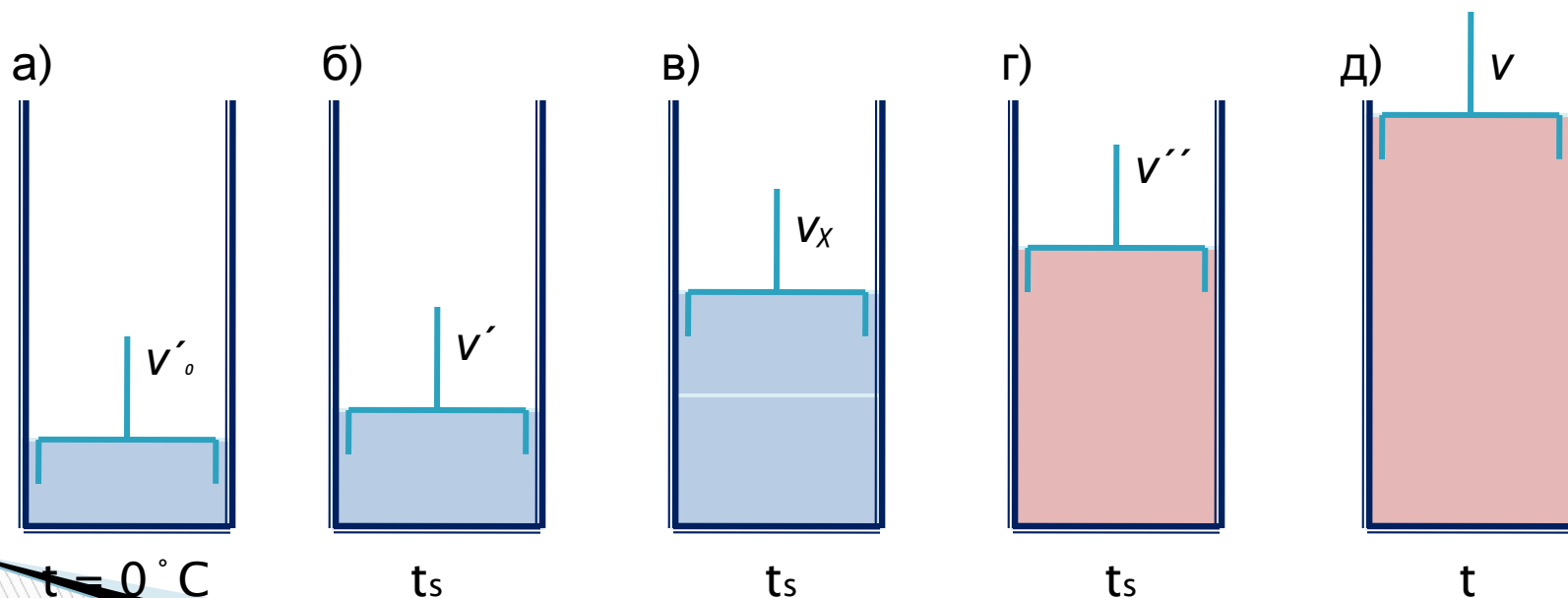
$$v' \leq v_x \leq v''$$



*при относительно невысоких давлениях*

$$v'' \gg v'$$

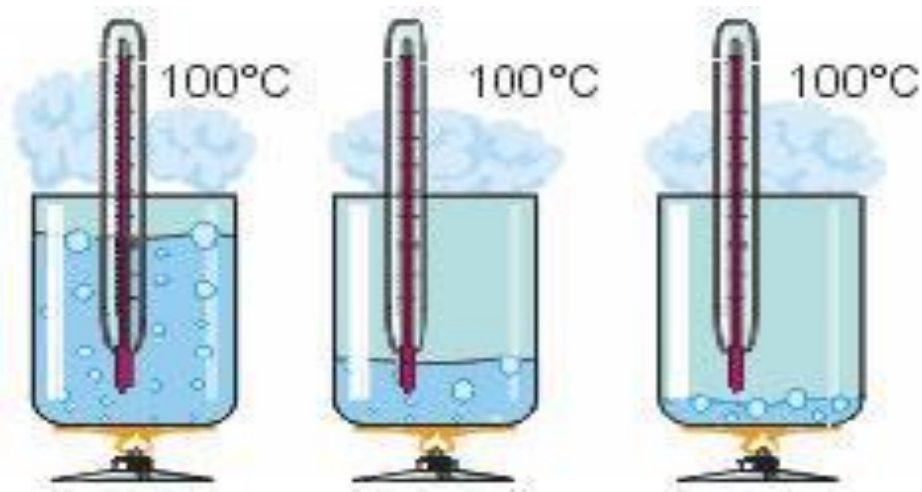
Например, при давлении 1 МПа удельный объем сухого насыщенного водяного пара больше удельного объема кипящей воды почти в 200 раз.



Когда процесс кипения протекает при постоянном давлении, температура жидкости, как было сказано выше, остаётся постоянной и равной температуре насыщения (температура кипения)  $t_s$  такую же температуру имеет насыщенный пар.

Исходя из равенства этих температур, насыщенному пару (как влажному, так и сухому) можно дать такое определение:

**Насыщенным** называется **пар**, имеющий температуру кипящей жидкости, из которой он получился (рис. в, г).



Если к сухому насыщенному пару подводить теплоту, то он становится **перегретым**.

Перегрев является третьей стадией рассматриваемого процесса парообразования, сопровождающейся повышением температуры пара и увеличением его удельного объёма (рис. д).

**Перегретым** называется **пар**, имеющий температуру выше температуры кипения жидкости, из которой он получился.

Температура перегретого пара обозначается через  $t$ , а удельный объем его – через  $v$ .

Разность  $t - t_s$  называется **степенью перегрева**.

Чем выше при данном давлении температура перегретого пара, тем больше степень перегрева и его удельный объем.

$$T \uparrow \Rightarrow (t - t_s) \uparrow \text{ и } v \uparrow$$

Отнятие теплоты от перегретого пара при постоянном давлении связано с уменьшением его температуры. Если она не понижается до температуры кипения, то пар остается перегретым.

Последнее свойство перегретого пара позволяет доставлять его потребителю в перегретом состоянии: более высокая работоспособность перегретого водяного пара ( по сравнению с насыщенным) является основной причиной его широкого использования в паровых двигателях

**Итак**, процесс получения пара при постоянном давлении в общем случае при постоянном давлении в общем случае можно разделить на три стадии:

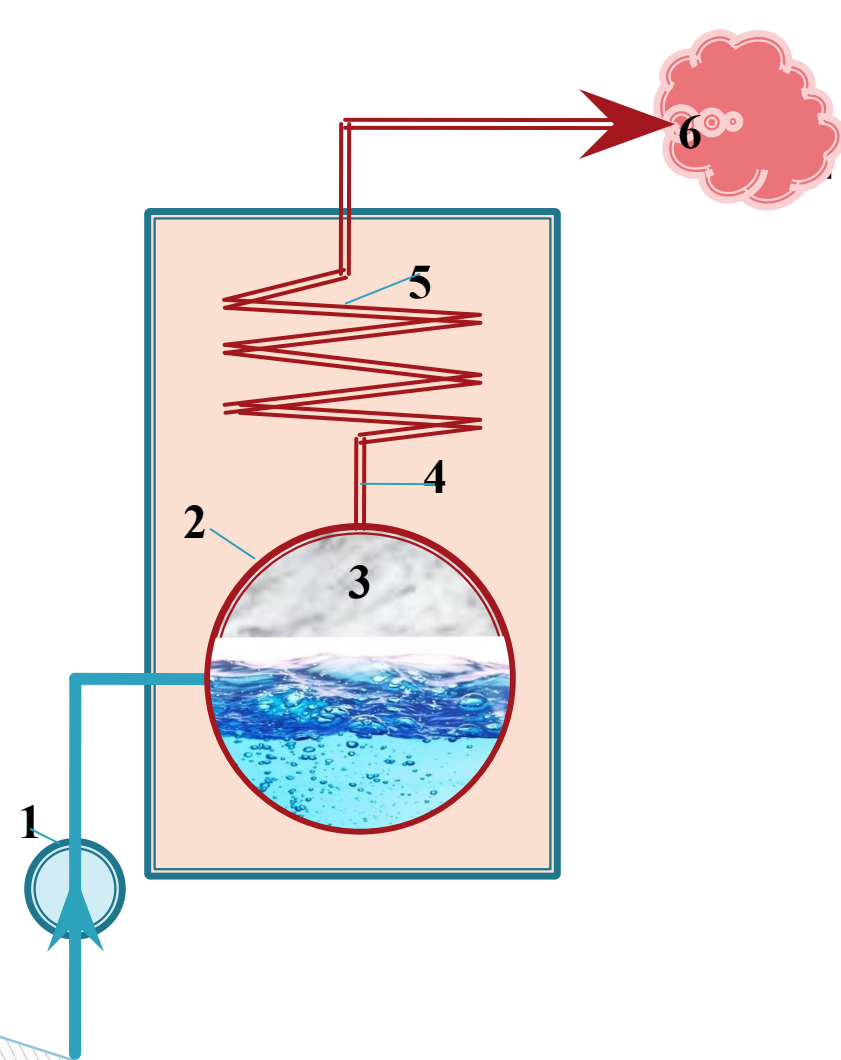
1. Подогрев жидкости до температуры кипения;
2. Кипение жидкости (получение сухого насыщенного пара из кипящей жидкости) при постоянной температуре;
3. Превращение сухого насыщенного пара в перегретый.



Состояние сухого насыщенного пара крайне неустойчиво, так как даже при самом незначительном подводе или отводе теплоты он превращается либо в перегретый (в первом случае), либо во влажный насыщенный пар (во втором случае).

Из рассматриваемого процесса парообразования следует также, что в присутствии жидкости пар может быть только влажным насыщенным. При подводе к нему теплоты без присутствия жидкости он подсушивается и только после того, как паросодержание становится равным единице, начинается перегрев.

# Схема котельной установки



Практически перегретый водяной пар получается в котельной установке.

Питательная вода по **трубе 1** нагнетается питательным насосом в **паровой котел 2**. В **паровом пространстве 3** этого котла образуется влажный насыщенный пар, имеющий температуру кипящей в котле воды. Из парового котла влажный пар отводится по **трубе 4** в **пароперегреватель 5**, обогреваемый горячими газами, где сначала превращается в сухой насыщенный, а затем в перегретый пар. Из пароперегревателя этот пар по **трубе 6** поступает к потребителю (например, в паровую турбину).

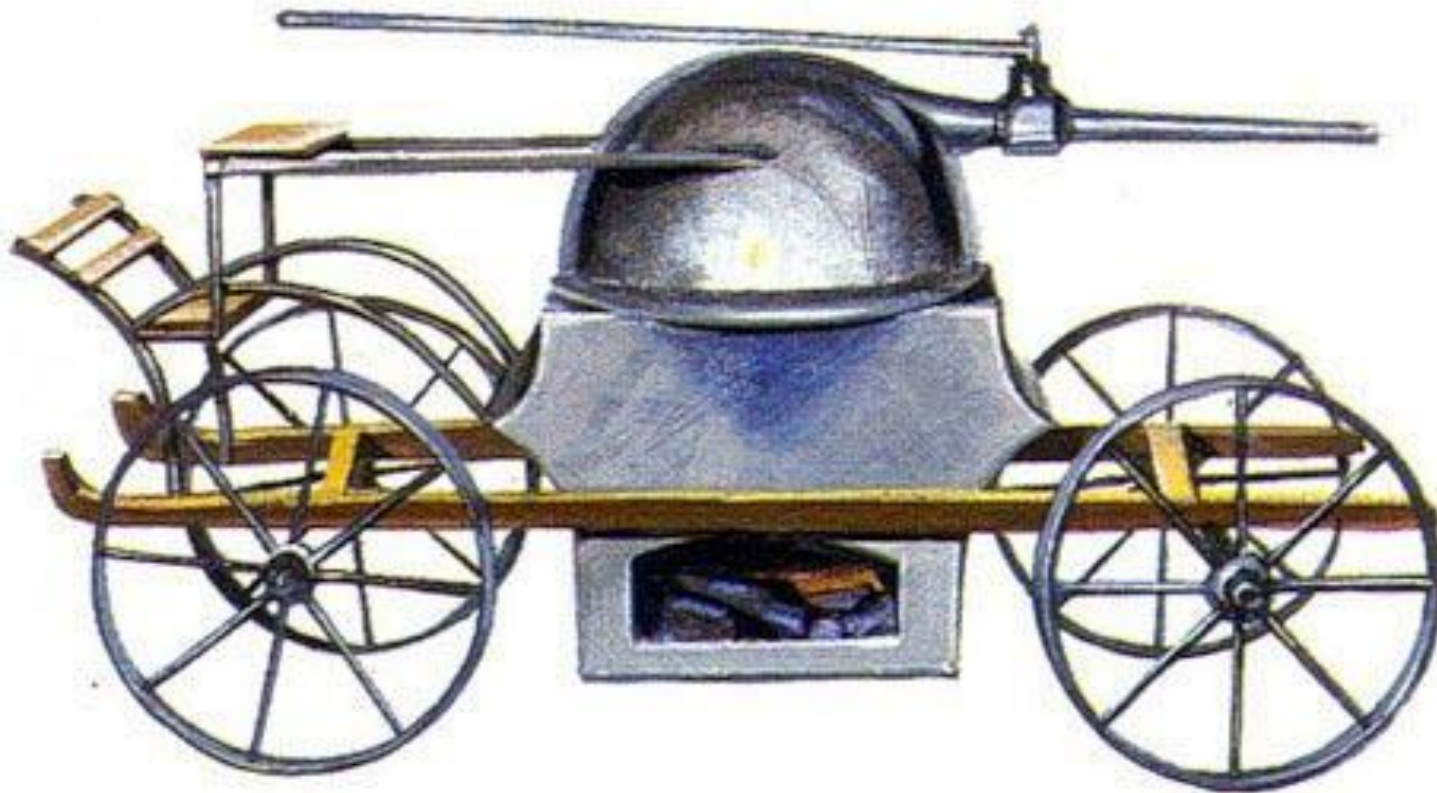
# Первые паровые машины



Паровой автомобиль Фербиста  
1672 год. Бельгия

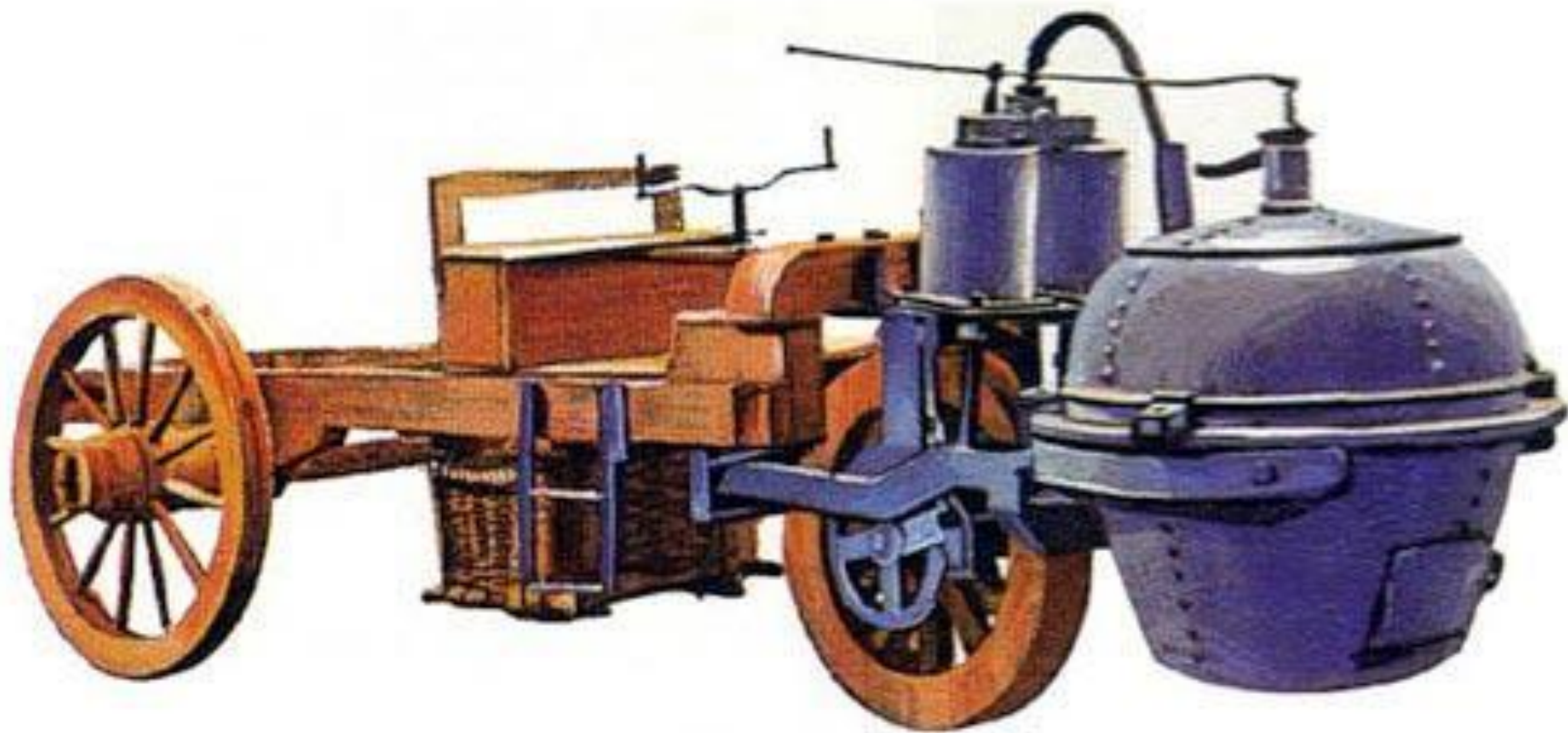


# Первые паровые машины



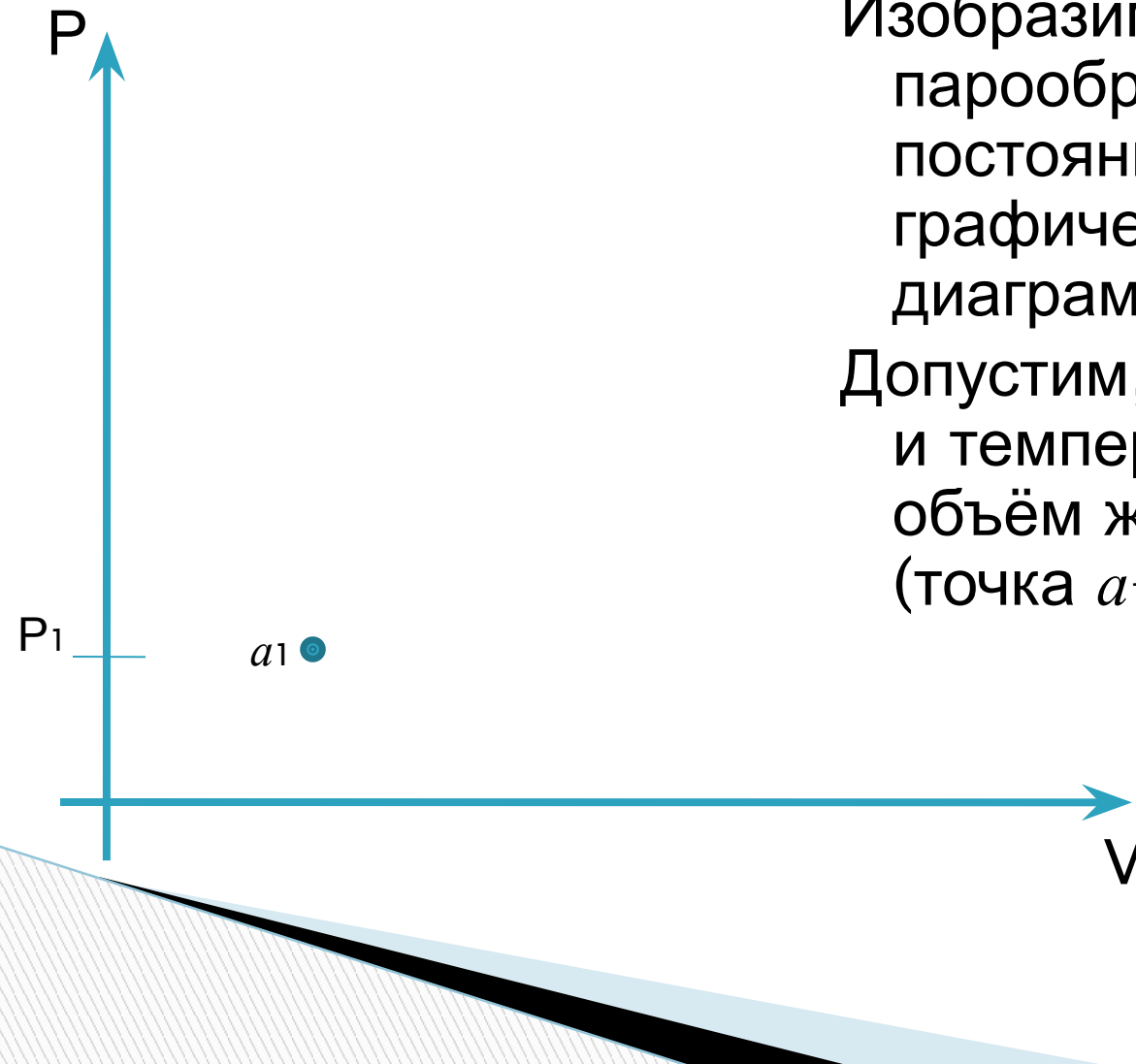
Реактивный автомобиль Ньютона  
1680 год. Великобритания

# Первые паровые машины



Автомобиль Куньо 1769 год. Франция

# Пограничные кривые



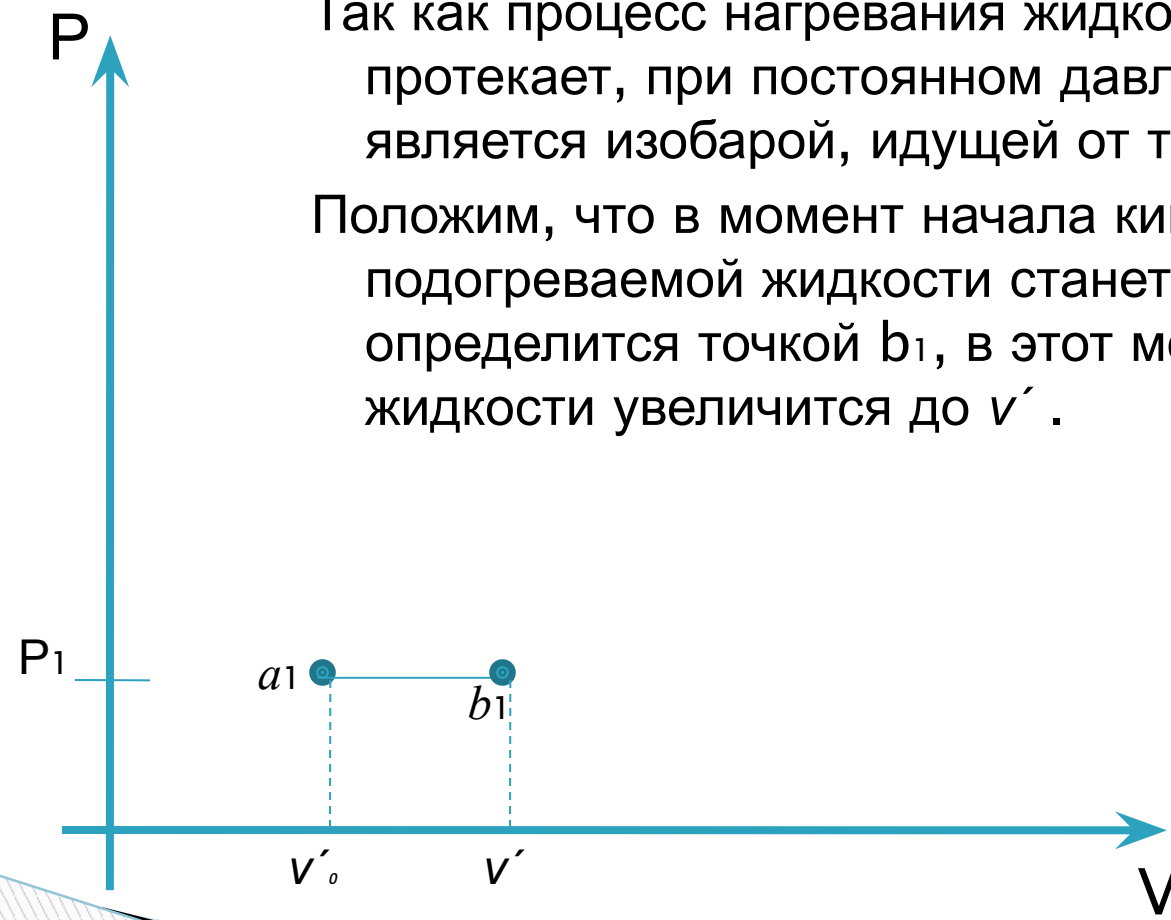
Изобразим процесс парообразования при постоянном давлении графически на  $PV$  – диаграмме.

Допустим, что при давлении  $P_1$  и температуре  $0^\circ\text{C}$  удельный объём жидкости равен  $v'_0$  (точка  $a_1$  на диаграмме).

# Пограничные кривые

Так как процесс нагревания жидкости и парообразования протекает, при постоянном давлении, то линия его является изобарой, идущей от точки  $a_1$  вправо.

Положим, что в момент начала кипения, когда температура подогреваемой жидкости станет равной  $t_s$  состояние её определится точкой  $b_1$ , в этот момент удельный объем жидкости увеличится до  $v'$ .

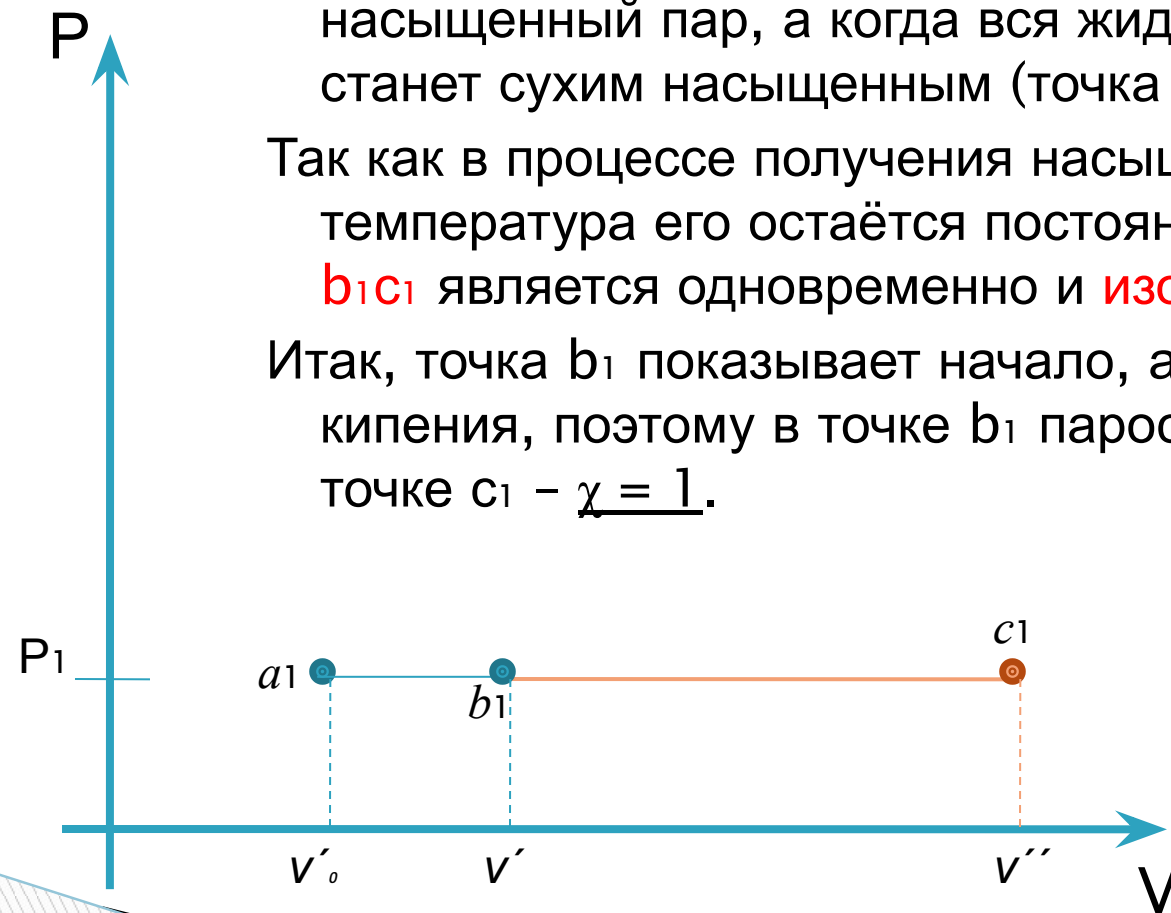


# Пограничные кривые

При дальнейшем подводе теплоты получается влажный насыщенный пар, а когда вся жидкость перейдет в пар, он станет сухим насыщенным (точка  $c_1$ ).

Так как в процессе получения насыщенного пара температура его остаётся постоянной, то участок **изобары**  $b_1c_1$  является одновременно и **изотермой**.

Итак, точка  $b_1$  показывает начало, а точка  $c_1$  – конец кипения, поэтому в точке  $b_1$  паросодержание  $\chi = 0$ , а в точке  $c_1$  –  $\chi = 1$ .



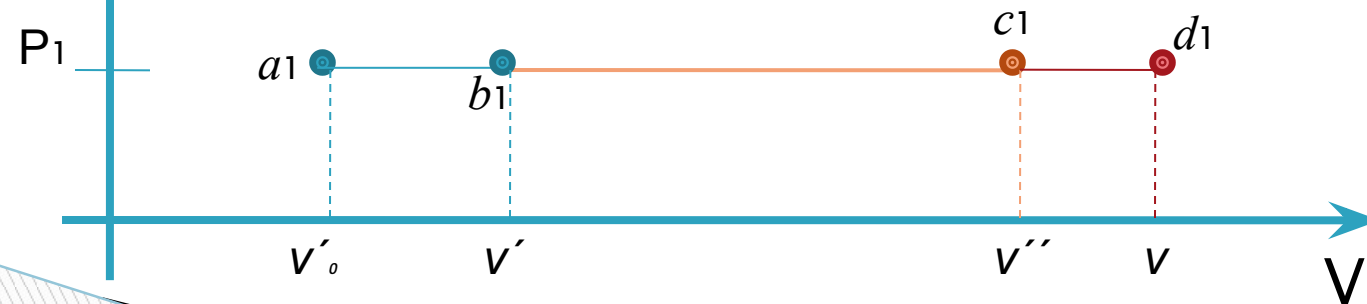
# Пограничные кривые

Промежуточные точки относятся к влажному насыщенному пару.

Понятно, что чем правее на линии  $b_1c_1$  располагается точка, определяющая состояние влажного насыщенного пара, тем он суше.

При сообщении сухому насыщенному пару теплоты он переходит в перегретый пар, состояние которого определяется, например точкой  $d_1$ .

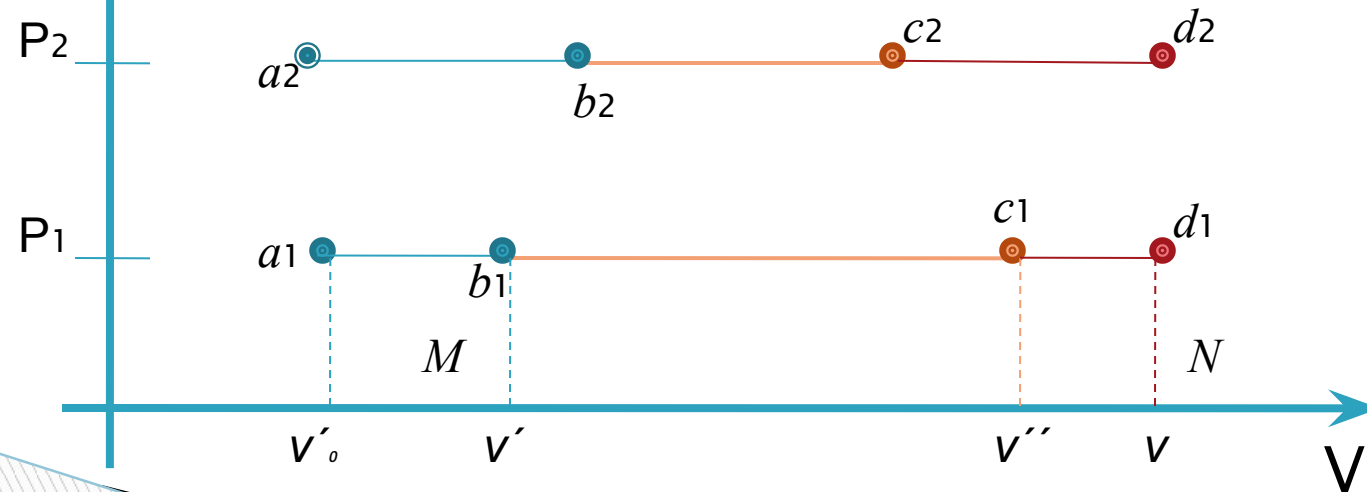
Чем теплоты подведено больше, тем удельный объем перегретого пара  $v$  будет также больше, и точка  $d_1$  располагается дальше от точки  $c_1$ .



# Пограничные кривые

Если подобный процесс парообразования проводить при более высоком давлении  $P_2$ , то изобара, соответствующая этому давлению, расположится выше.

Жидкость считают практически несжимаемой и полагают, что удельный объём её не зависит от давления. Поэтому без заметной погрешности можно точку  $a_2$ , определяющую состояние жидкости при давлении  $P_2$  и температуре  $0^\circ\text{C}$ , расположить на одной вертикали с точкой  $a_1$ .

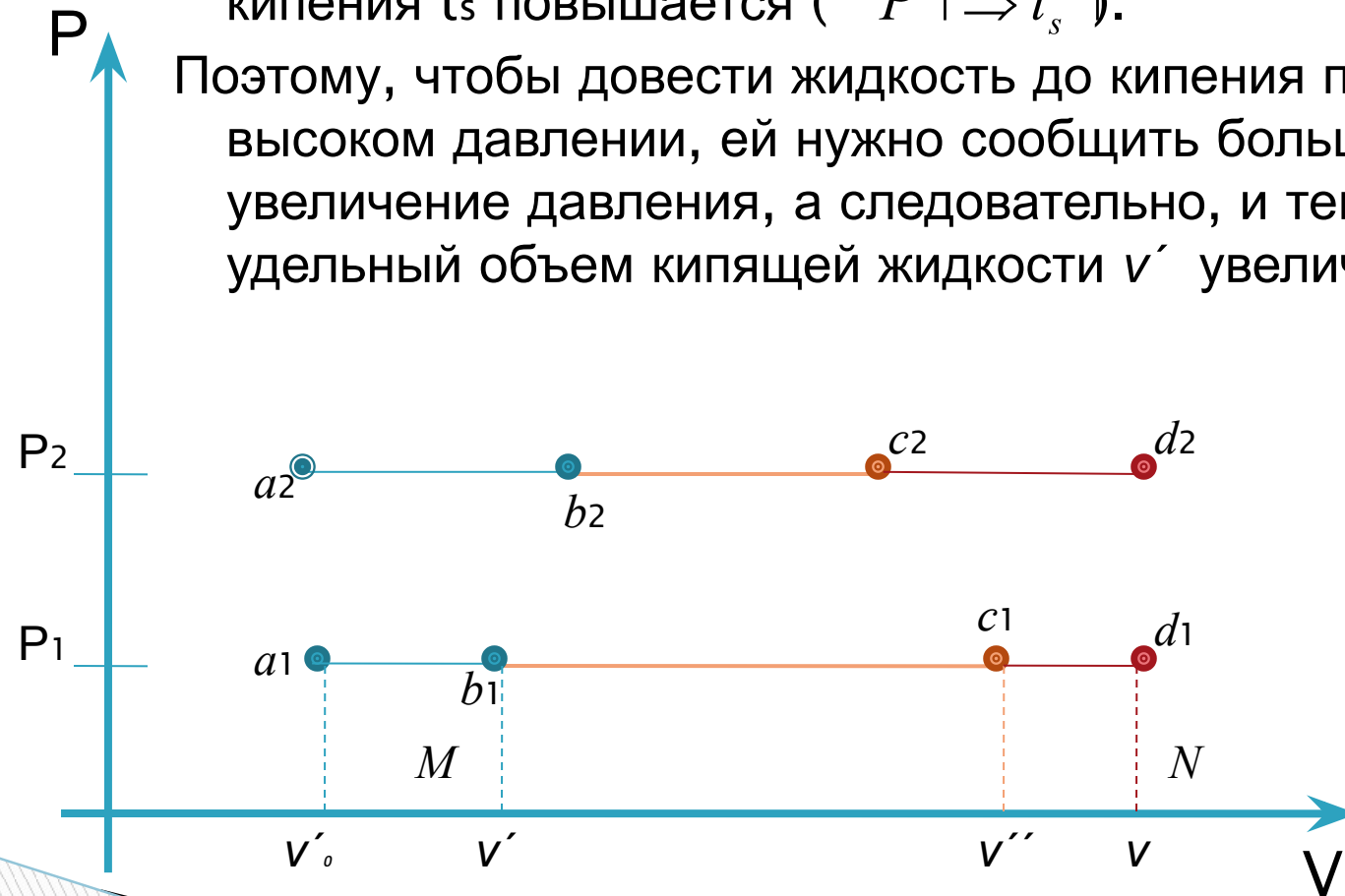


(в действительности точка  $a_2$  должна быть расположена несколько левее точки  $a_1$ , как показано на рисунке).

# Пограничные кривые

Как уже отмечалось, с увеличением давления температура кипения  $t_s$  повышается ( $P \uparrow \Rightarrow t_s \uparrow$ ).

Поэтому, чтобы довести жидкость до кипения при более высоком давлении, ей нужно сообщить больше теплоты. С увеличением давления, а следовательно, и температуры удельный объем кипящей жидкости  $v'$  увеличивается.

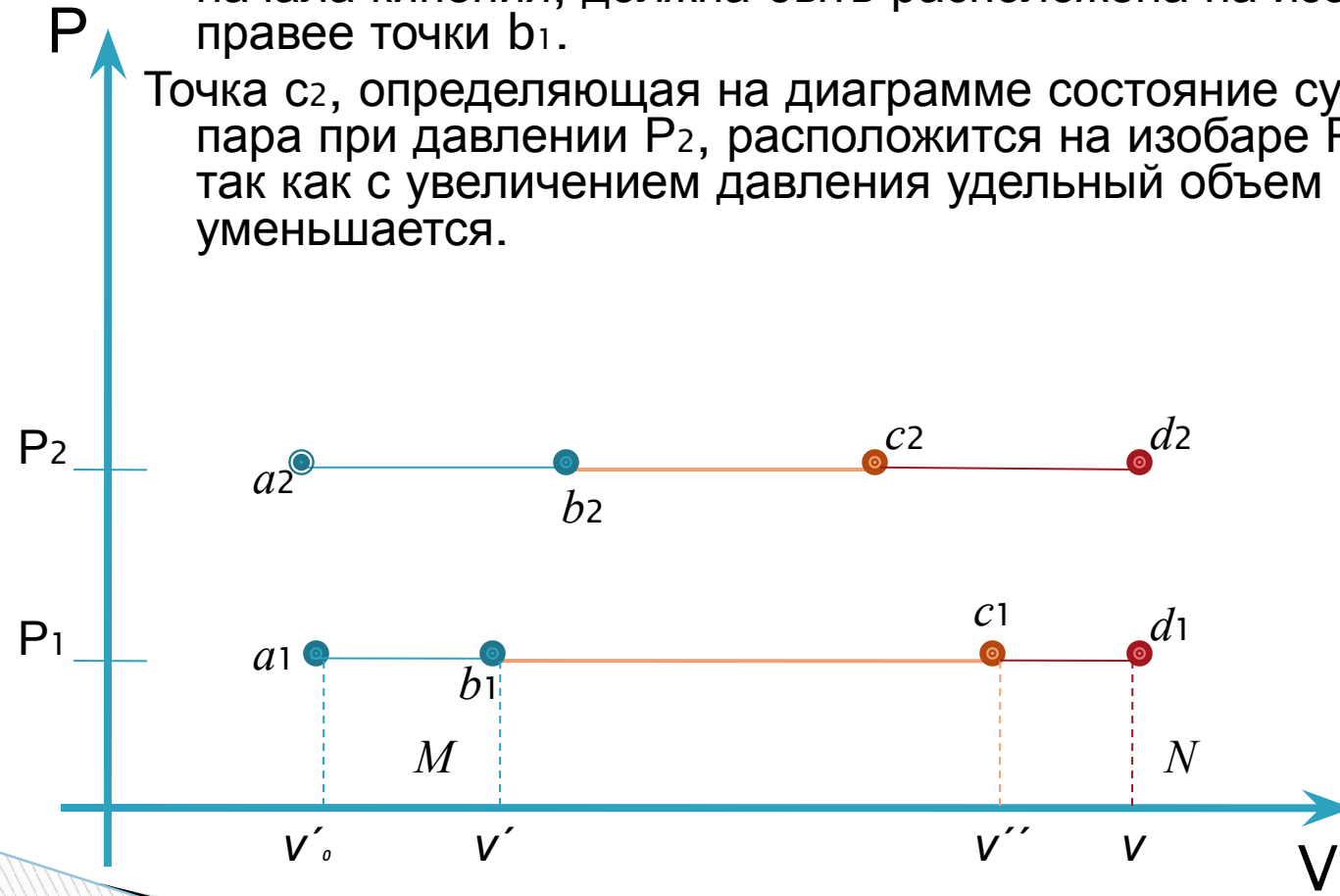




# Пограничные кривые

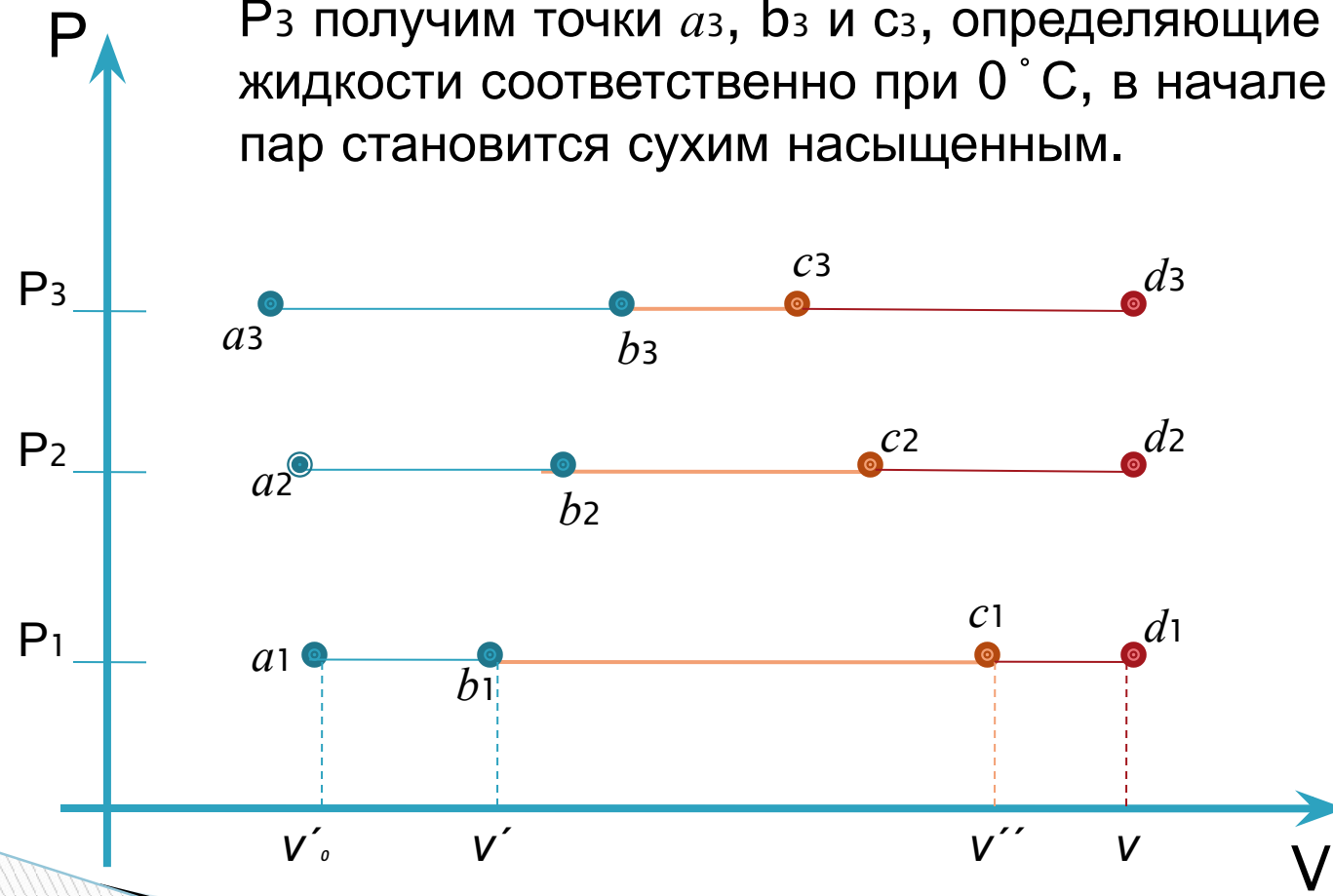
Ясно, это и точка  $b_2$ , определяющая состояние жидкости в момент начала кипения, должна быть расположена на изобаре  $P_2$  несколько правее точки  $b_1$ .

Точка  $c_2$ , определяющая на диаграмме состояние сухого насыщенного пара при давлении  $P_2$ , расположится на изобаре  $P_2$  левее точки  $c_1$ , так как с увеличением давления удельный объем насыщенного пара уменьшается.

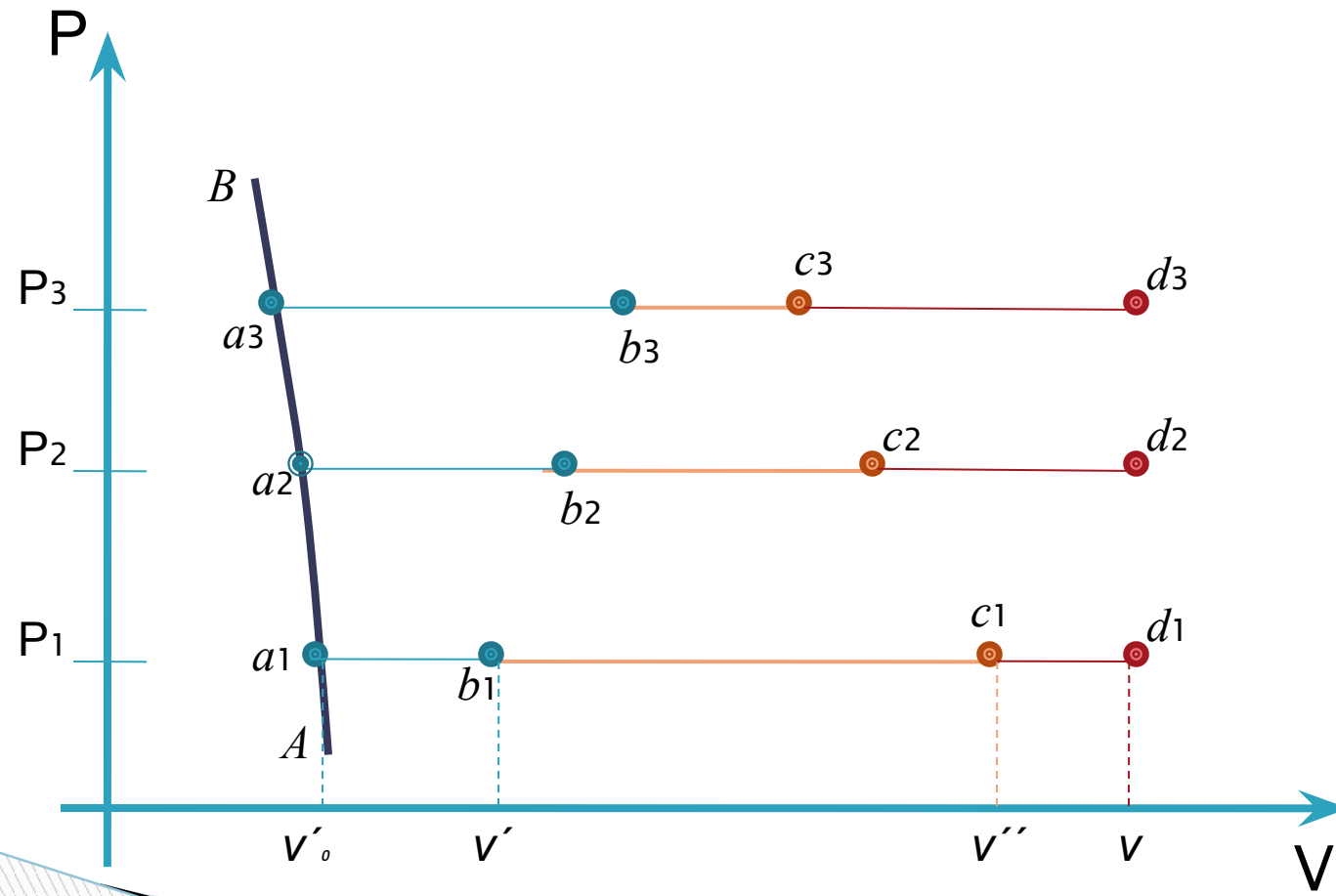


# Пограничные кривые

В процессе парообразования при ещё более высоком давлении  $P_3$  получим точки  $a_3$ ,  $b_3$  и  $c_3$ , определяющие состояние жидкости соответственно при  $0^\circ\text{C}$ , в начале кипения и когда пар становится сухим насыщенным.



# Пограничные кривые



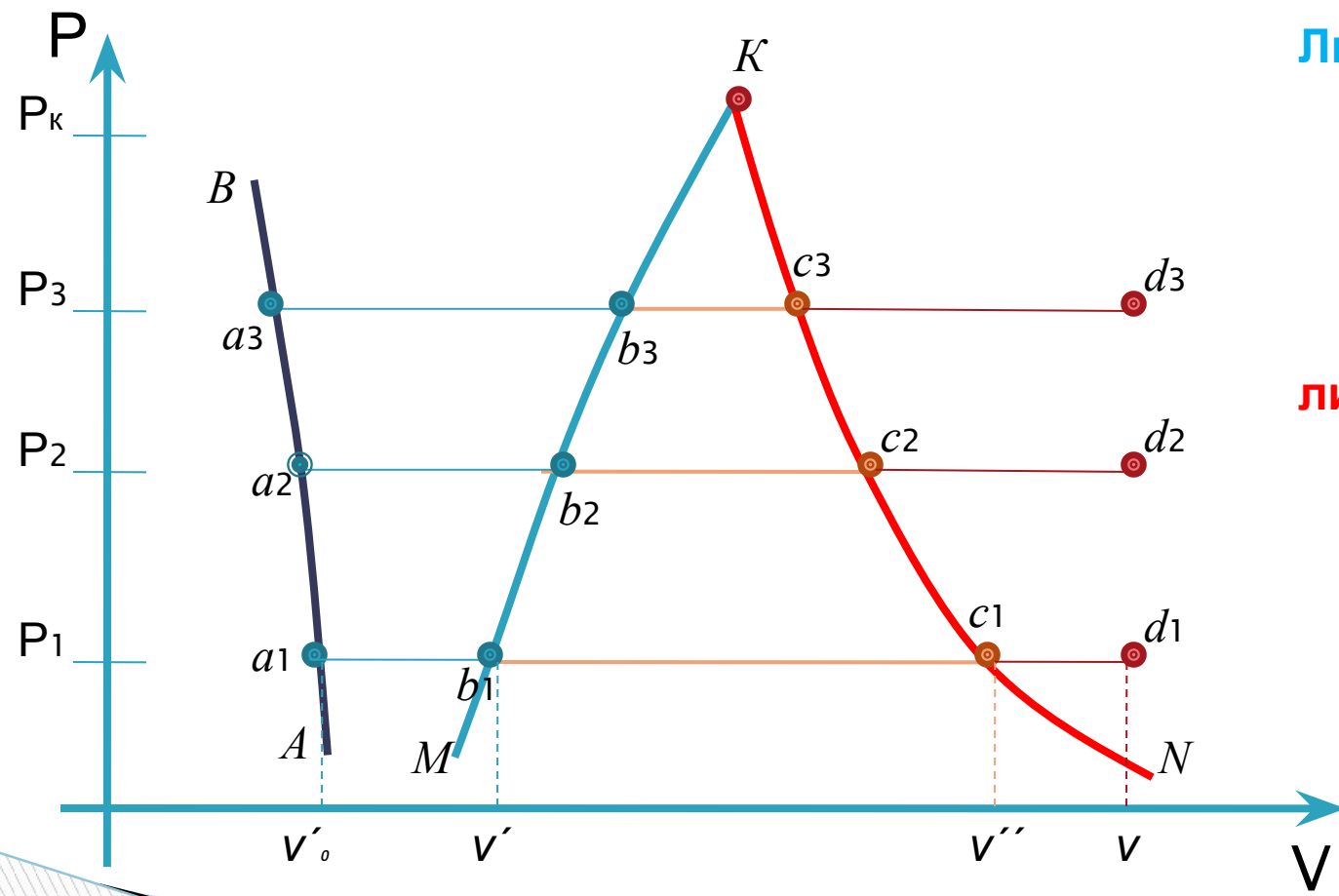
Если через  
одноименные  
точки провести  
плавные линии,  
то получим  
**линию  $AB$**   
удельных  
объёмов  
жидкости при  
 $0^\circ\text{C}$

# Пограничные кривые

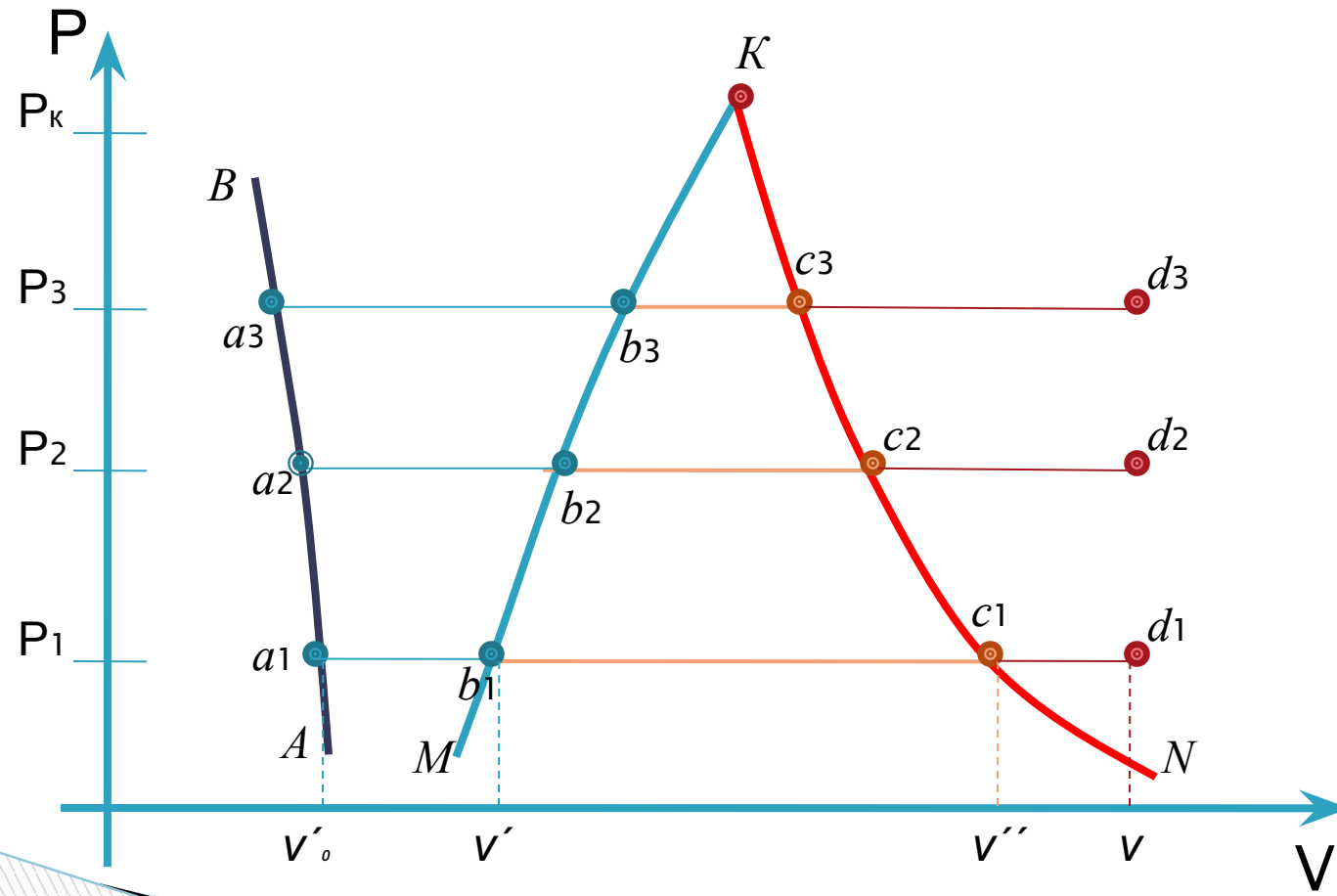
Линии МК и НК,  
сходятся в **точке К**.

**Линия МК** представляет собой геометрическое место точек, характеризующих состояние кипящей жидкости, а

**линия НК** – геометрическое место точек, характеризующих состояние сухого насыщенного пара.



# Пограничные кривые



Таким образом, линии МК и НК разделяют всю диаграмму на три области:

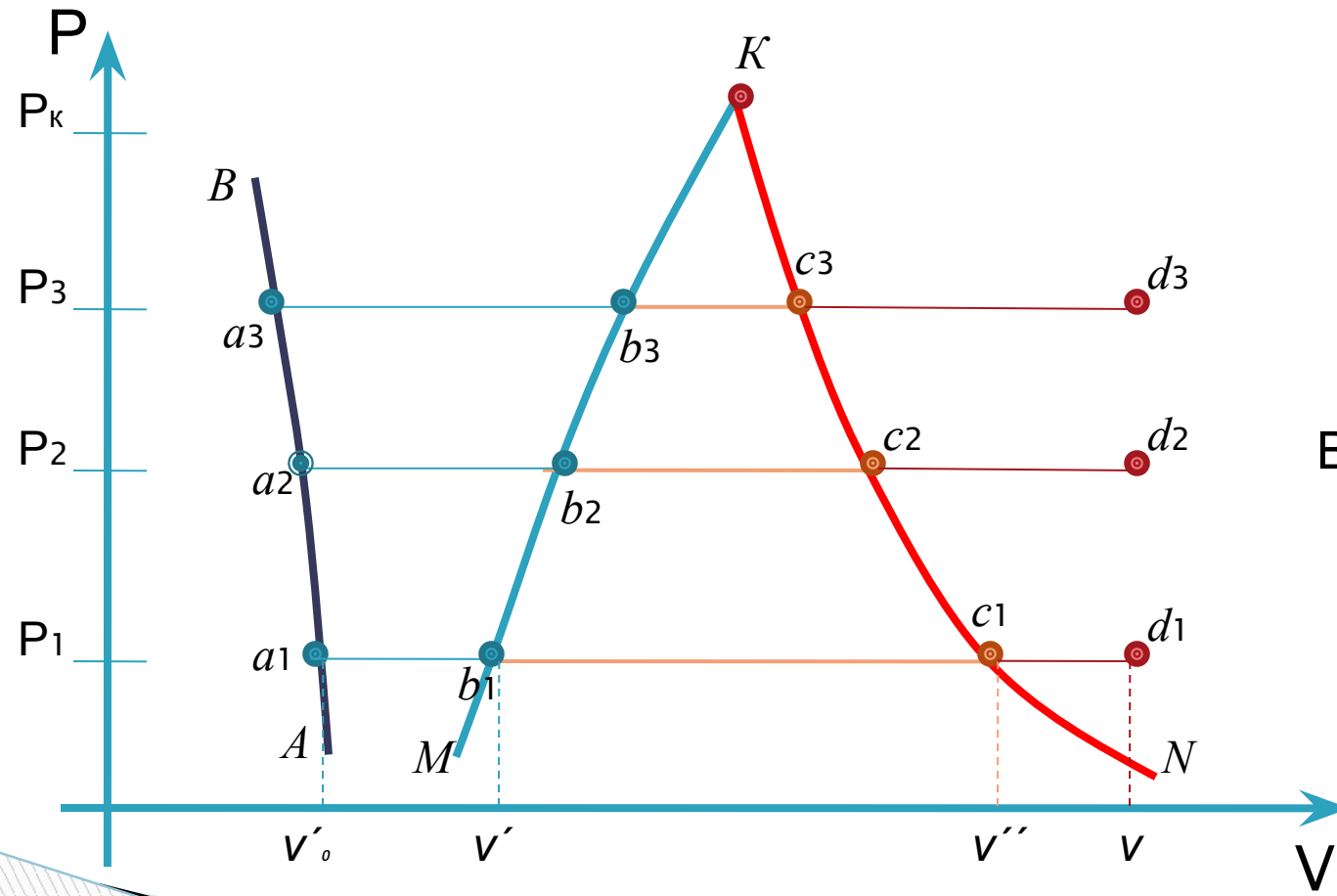
- **Область жидкости**, лежащую между линиями  $AB$  и  $MK$ ;
- **Область влажного насыщенного пара**, расположенную между пограничными линиями  $MK$  и  $NK$ ;
- **Область перегретого пара**, находящуюся правее линии  $NK$ .

# Пограничные кривые

## Линия МК

называется пограничной **кривой жидкости**, а **линия НК** – пограничной **кривой сухого насыщенного пара**.

В точке  $K$  кипящая жидкость и сухой насыщенный пар имеют одинаковые параметры  $P_k$ ,  $t_k$  и  $v_k$  называемые критическими, а сама **точка  $K$  – критической**.



# Критические температуры и давления некоторых газов и водяного пара

Наименование газа	Химическая формула	Критическая температура, °С	Критическое давление, М Па
Азот	N <sub>2</sub>	-147,0	3,39
Аммиак	NH <sub>3</sub>	132,3	11,3
Вода	H <sub>2</sub> O	374,15	22,129
Водород	H <sub>2</sub>	-239,9	1,29
Воздух (сухой)	-	-140,7	3,76
Кислород	O <sub>2</sub>	-118,4	5,07
Метан	CH <sub>4</sub>	-82,1	4,64
Окись углерода	CO	-140	3,49
Сернистый газ	SO <sub>2</sub>	157,5	7,88
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	31,04	7,38
Фреон - 11	CF <sub>3</sub> Cl	198	4,37
Хлор	Cl <sub>2</sub>	144	7,7
Эфир диэтиловый	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	194	3,61

Наличие критической точки у различных веществ впервые было установлено Д.И. Менделеевым. Это открытие оказалось чрезвычайно важным для всего дальнейшего развития теории реальных газов.

В настоящее время принято считать для воды:

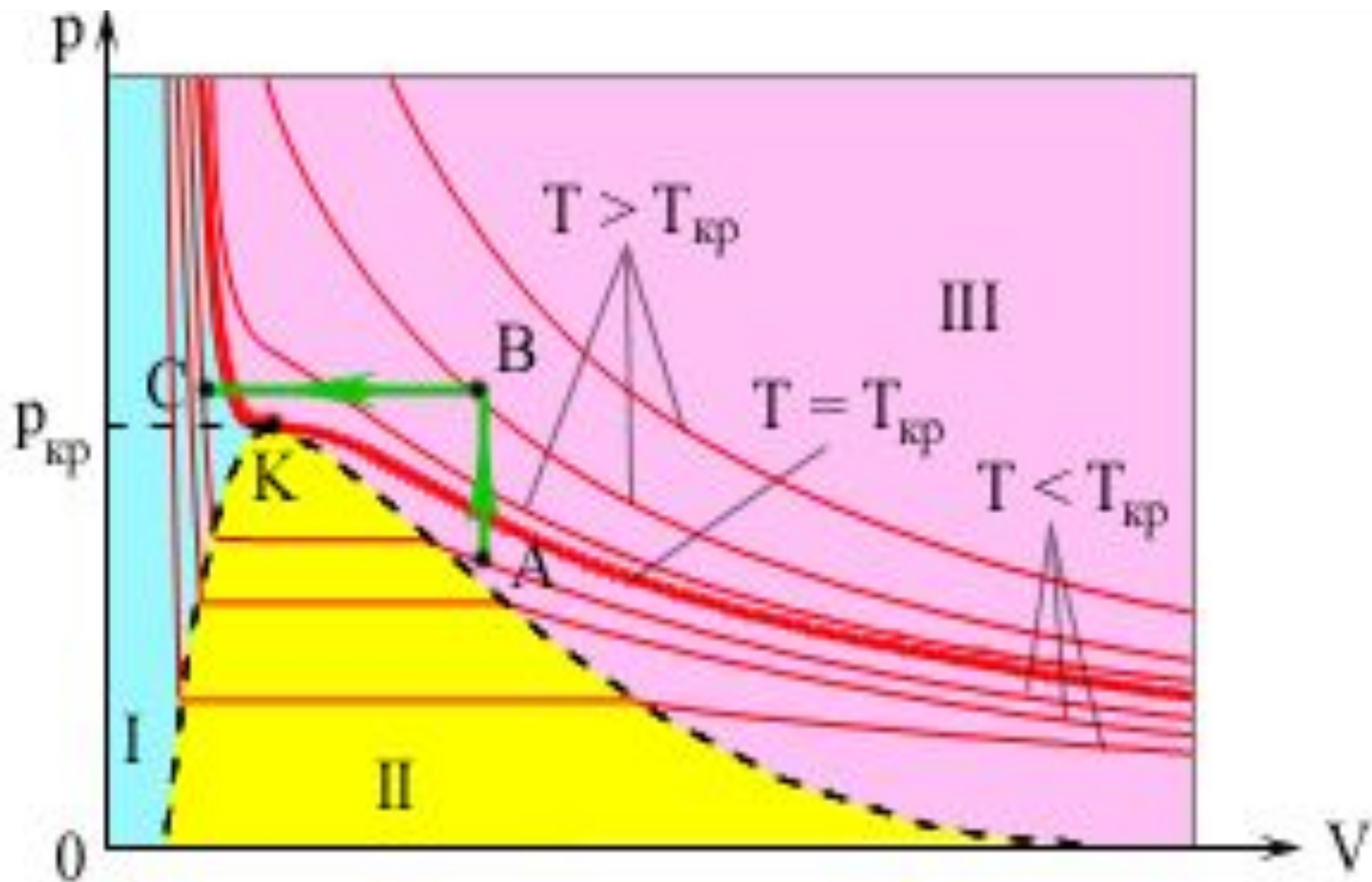
$$P_k = 22,129 \text{ М Па} \approx 22,1 \text{ М Па}$$

$$t_k = 374,15 \text{ }^\circ\text{С}$$

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



# Критическая температура



Если пар имеет температуру, равную или выше критической, то никакое повышение давления при постоянной температуре никогда не переведёт его в жидкость.

Чем температура перегретого пара выше критической, тем он по своим свойствам больше приближается к идеальным газам.

Однако в интервале температур и давлений, в котором он используется в пароэнергетических установках (паровых котлах и паровых турбинах), различие в его свойствах и свойствах идеальных газов настолько велико, что перегретый пар недопустимо рассматривать как идеальный газ, подобно тому, как это делается в расчётах с газами.

Такой пар приходится рассчитывать по формулам, в которых учитываются и межмолекулярные связи, и суммарный объём молекул в общем объёме, занимаемом паром.

Эти формулы, как правило, сложны и поэтому везде, где возможно, их заменяют таблицами и диаграммами, составленными на основании этих формул и опытных данных.

Такой графоаналитический метод расчёта оказывается достаточно простым и точным.

# Домашние задание





Спасибо за внимание  
Урок 01

