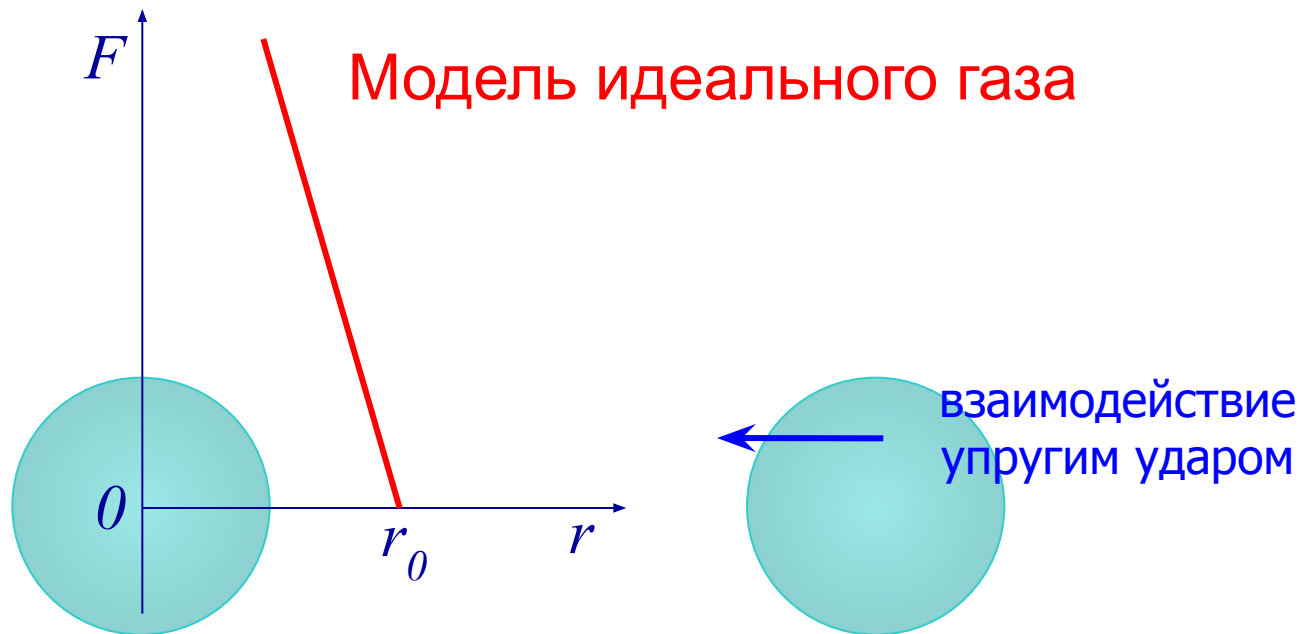


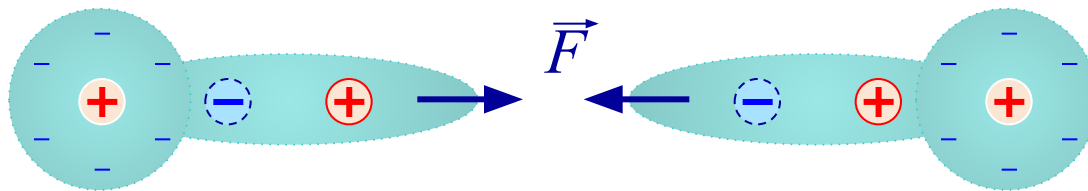
Тема 5. Реальные газы. Жидкости. Твердые тела

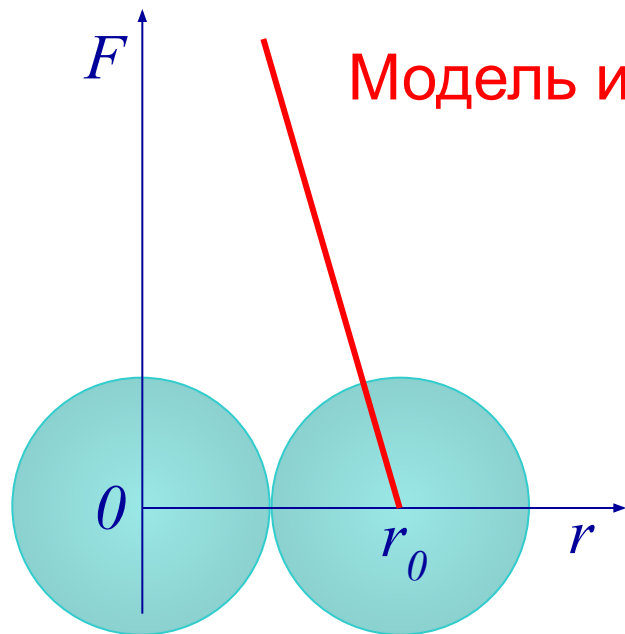
§5.1. Модель реального газа.

Уравнение Ван-дер-Ваальса



Модель реального газа

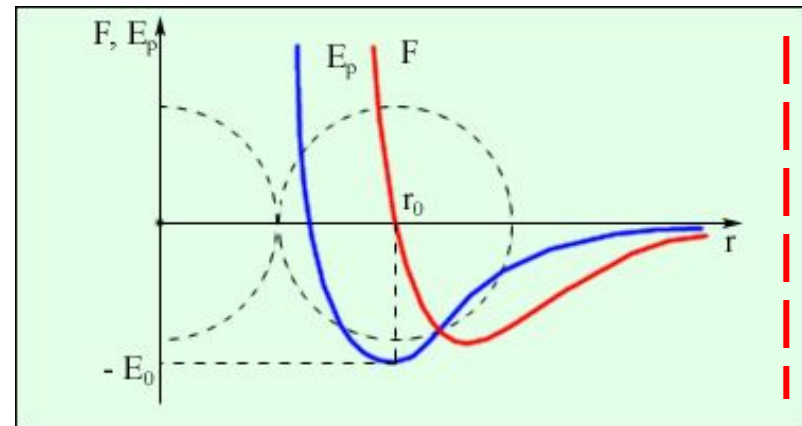
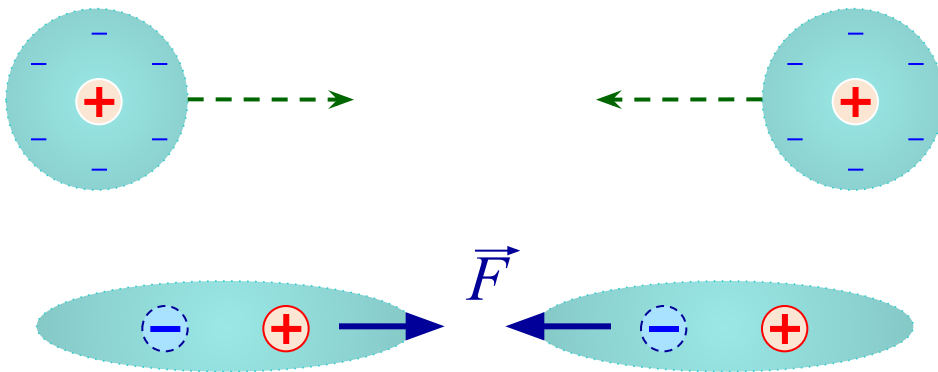




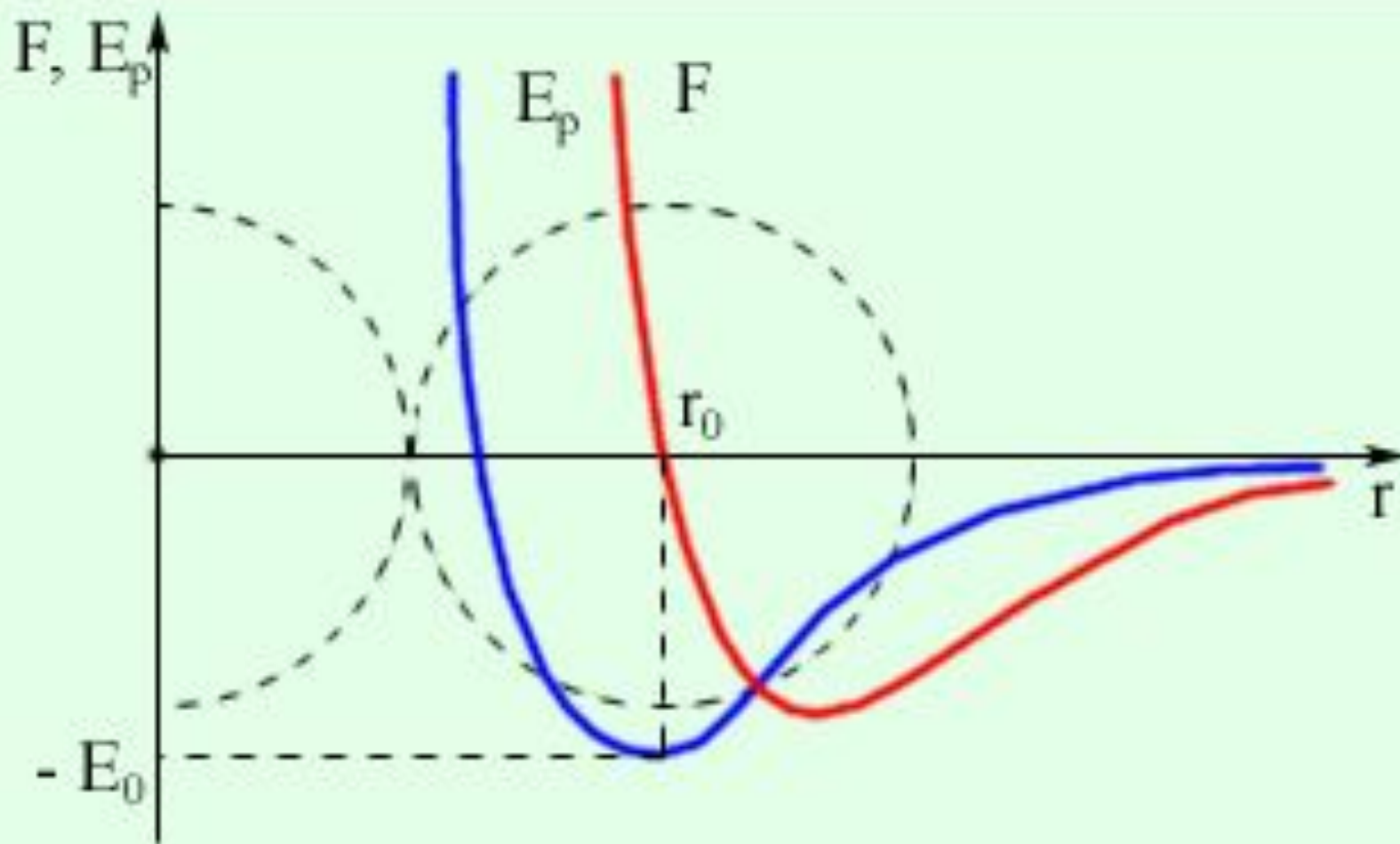
Модель идеального газа

← взаимодействие упругим ударом

Модель реального газа



Сила взаимодействия F и потенциальная энергия взаимодействия E_p двух молекул



Модель идеального газа: $pV = \frac{M}{\mu} RT$

Модель Ван-дер-Ваальса

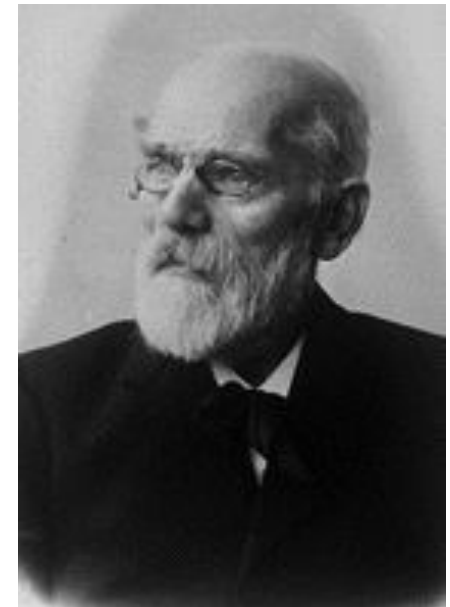
$$(p + p_{\text{мол}})(V - b) = \frac{M}{\mu} RT$$

$$(p = p_{\text{ст}} = p_{\text{внут}} - p_{\text{мол}})$$

$$p_{\text{мол}} \approx \frac{a}{V^2}; \quad b \sim V_{\text{мол}}$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = \frac{M}{\mu} RT$$

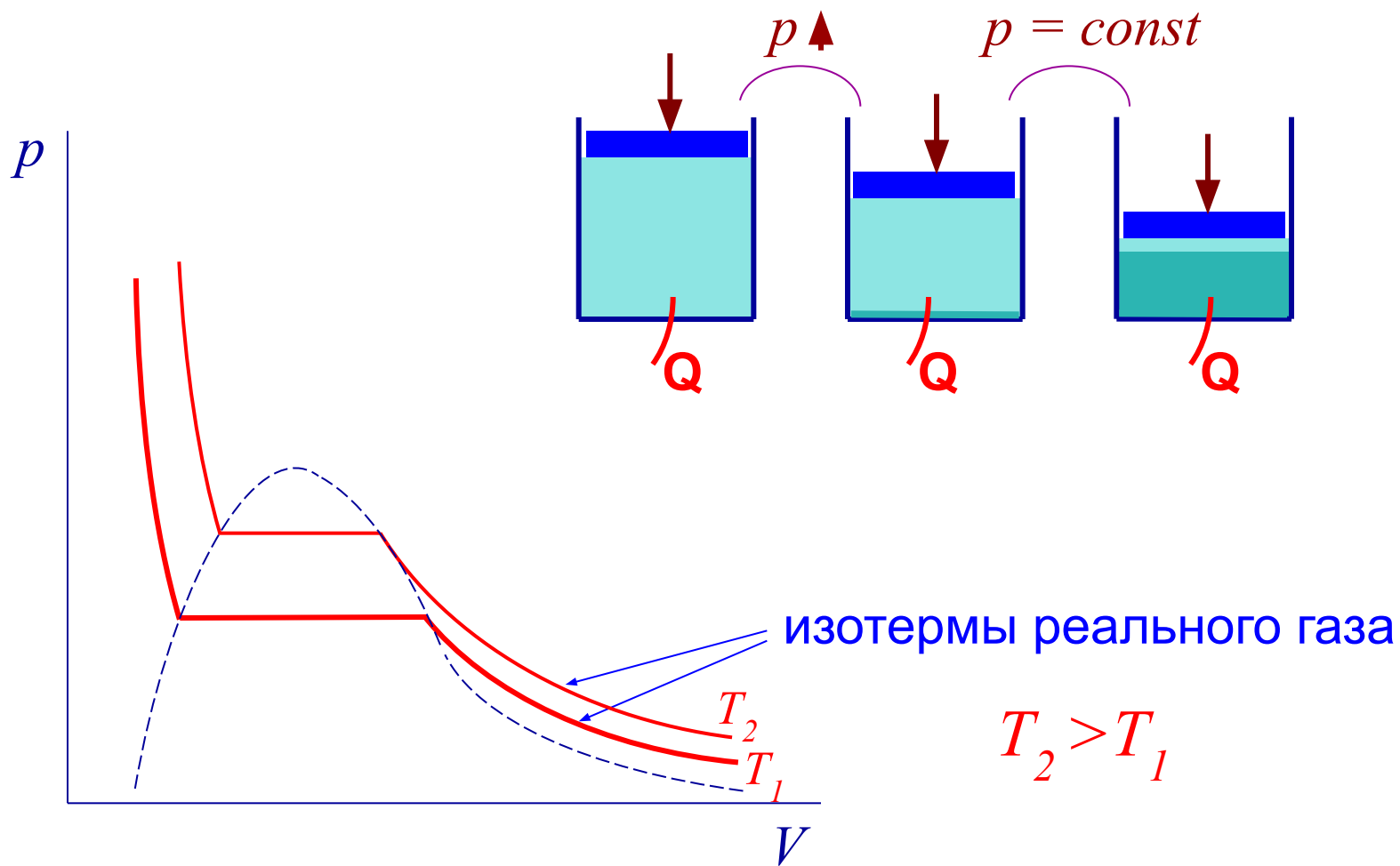


Ван-дер-Ваальс
(van der Waals) Ян
(1837 – 1923)

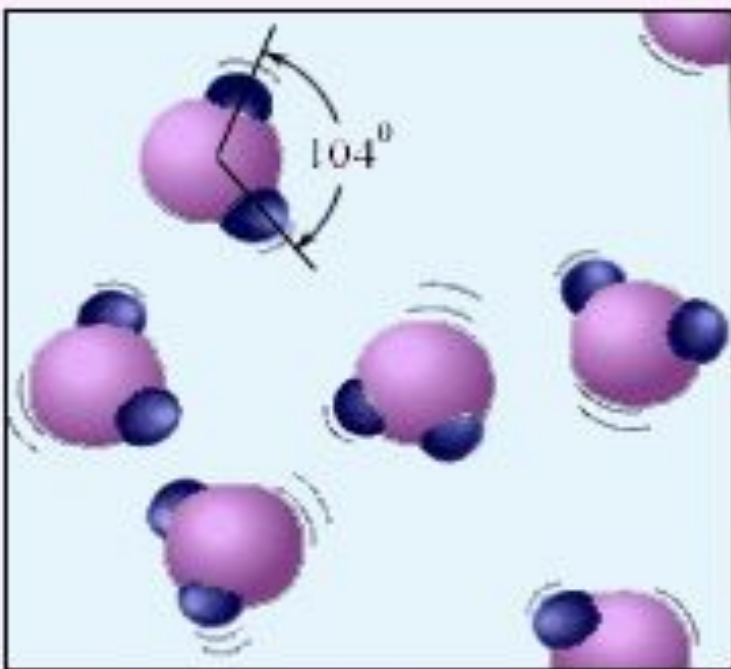
Тема 5. Реальные газы. Жидкости. Твердые тела

§5.2. Конденсация реального газа.
Изотермы Ван-дер-Ваальса

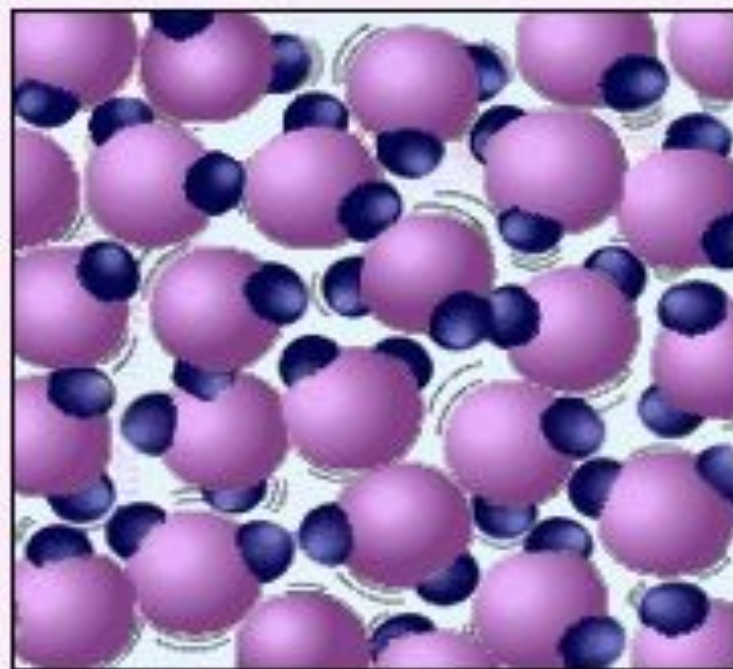
Изотермы реального газа



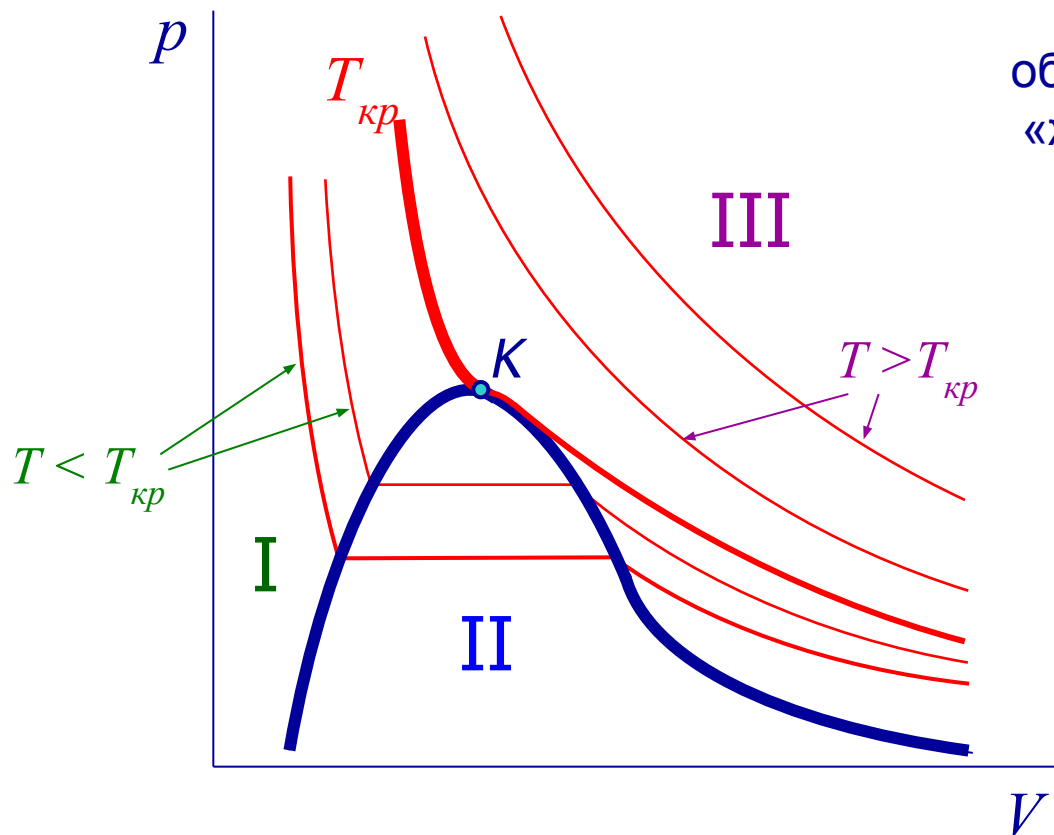
Водяной пар (1) и вода (2). Молекулы воды увеличены примерно в $5 \cdot 10^7$ раз.



(1)



(2)



Область I – жидкость,

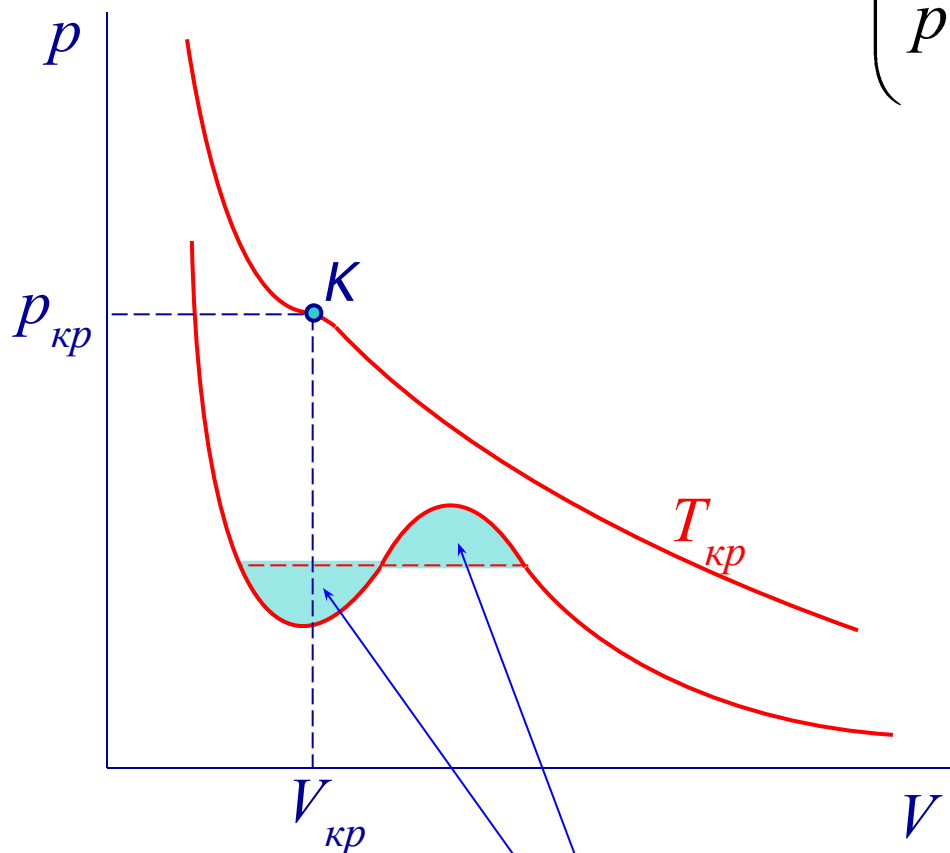
область II – двухфазная система
«жидкость + насыщенный пар»,

область III –
газообразное вещество.

K – критическая точка

Изотермы Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = \frac{M}{\mu} RT$$



$$p_{кр} = \frac{a}{27b^2}$$

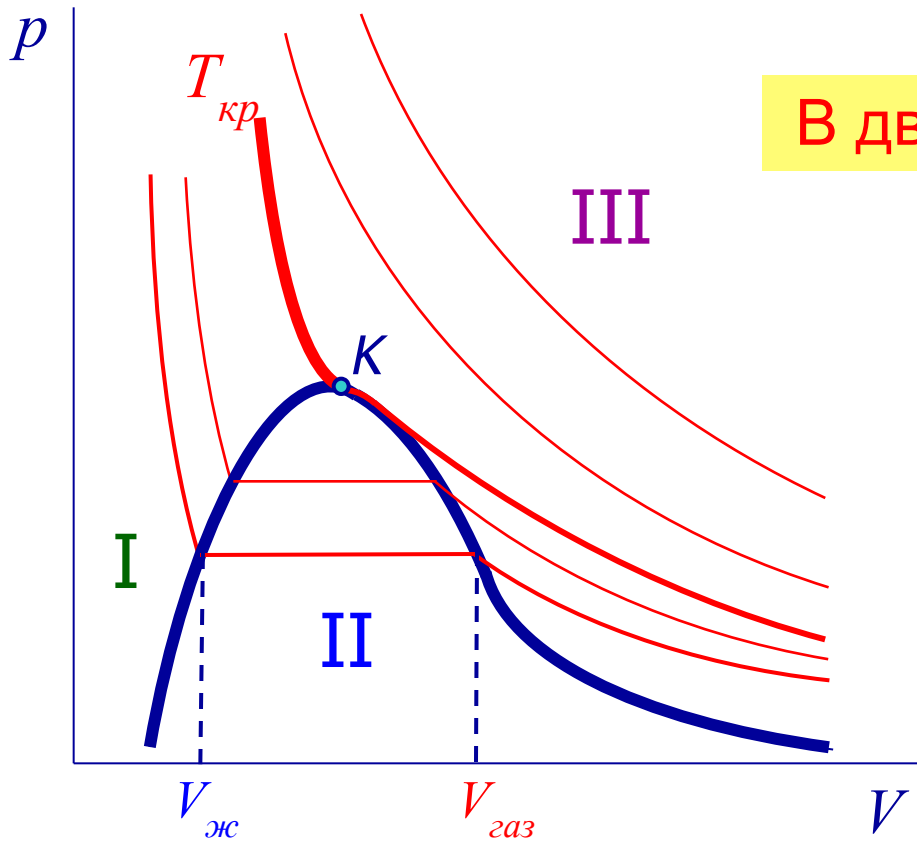
$$V_{кр} = 3b$$

$$T_{кр} = \frac{8a}{27Rb}$$

площади равны
(правило Максвелла)

Тема 5. Реальные газы. Жидкости . Твердые тела

§5.3. Область двухфазных состояний.
Равновесие фаз.
Критическое состояние



В двухфазном состоянии II:

$$p_{\text{газ}} = p_{\text{нас}} \sim T$$

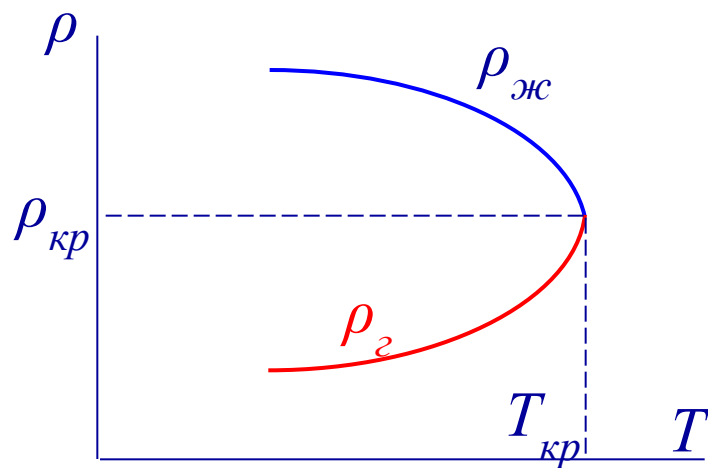
$$\rho_{\text{газ}} = \frac{M}{V_{\text{газ}}}; \quad \rho_{\text{ж}} = \frac{M}{V_{\text{ж}}}$$

При $T < T_{\text{крит}}$:

$$V_{\text{ж}} < V_{\text{газ}}; \quad \rho_{\text{ж}} > \rho_{\text{газ}}$$

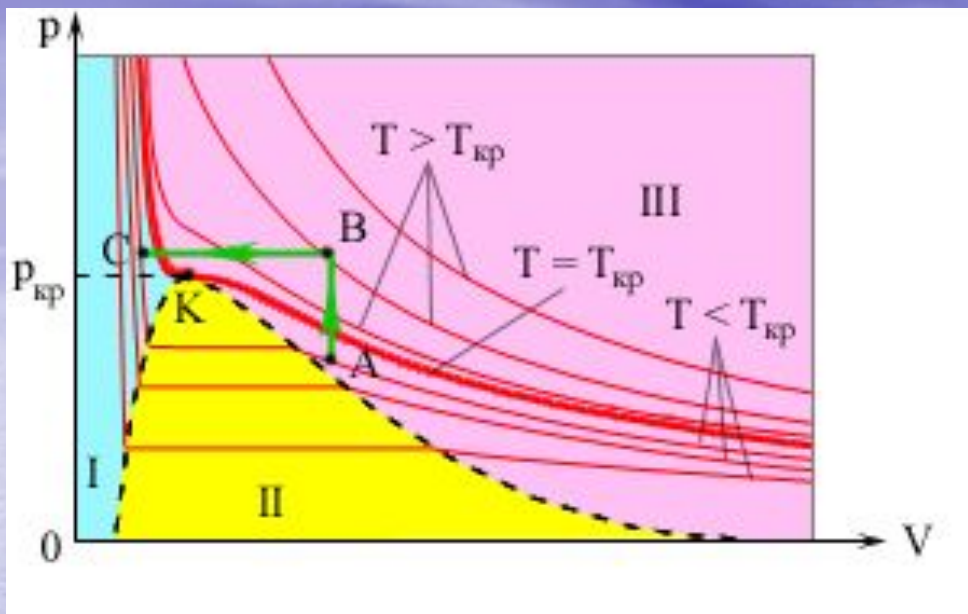
При $T = T_{\text{крит}}$:

$$\rho_{\text{ж}} = \rho_{\text{газ}} = \rho_{\text{кр}}$$

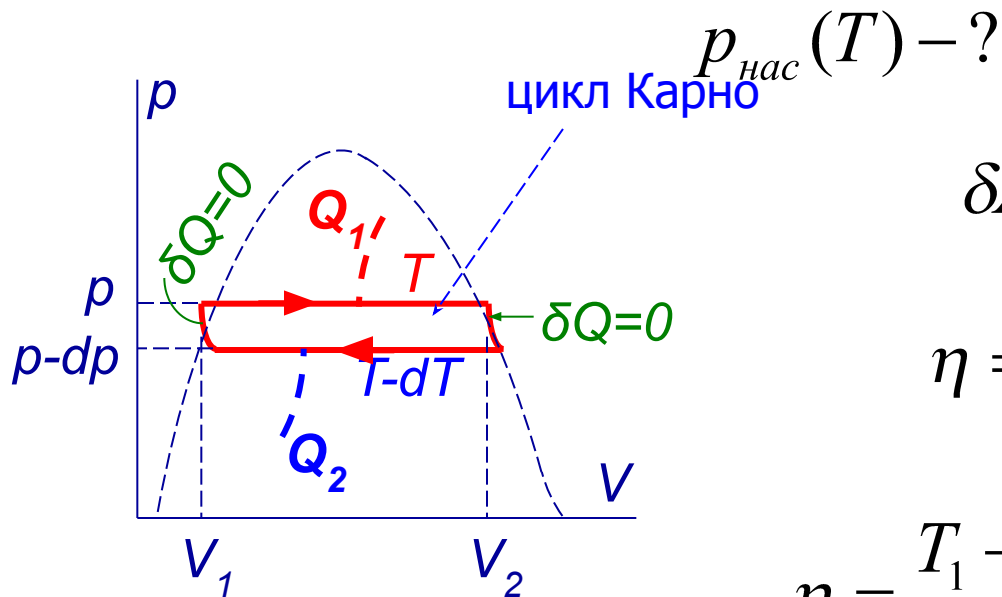


Тема 5. Реальные газы. Жидкости . Твердые тела

§5.4. Область двухфазных состояний.
Уравнение Клапейрона-Клаузиуса



Определение: *теплота, идущая на изменение фазового состояния вещества, называется теплотой фазового превращения или скрытой теплотой перехода*



$$\delta A = (V_2 - V_1) dp$$

$$\eta = \frac{\delta A}{Q_1} = \frac{V_2 - V_1}{L} dp$$

← скрытая теплота
парообразования

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{dT}{T}$$

$$\frac{V_2 - V_1}{L} dp = \frac{dT}{T};$$

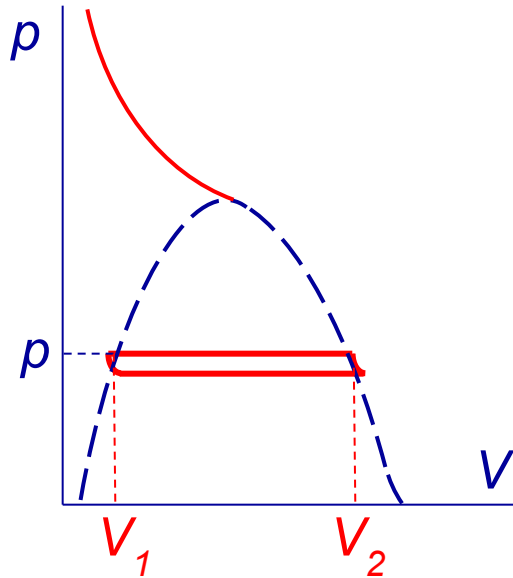
$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)}$$

- уравнение
Клапейрона -
Клаузиуса

Клапейрон (Clapeyron)
Бенуа Поль Эмиль
(1799 – 1864)



Клаузиус (Clausius)
Рудольф Юлиус Эмануэль
(1822 – 1888)



$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)} \quad \text{- уравнение Клапейрона - Клаузиуса}$$

$$L = L(T)$$

При $T \ll T_{\text{крит}}$:

$$L \approx \text{const}; \quad V_1 \ll V_2$$

$$V_2 - V_1 \approx V_{\text{газ}} = \frac{RT}{p} \quad (\nu = 1);$$

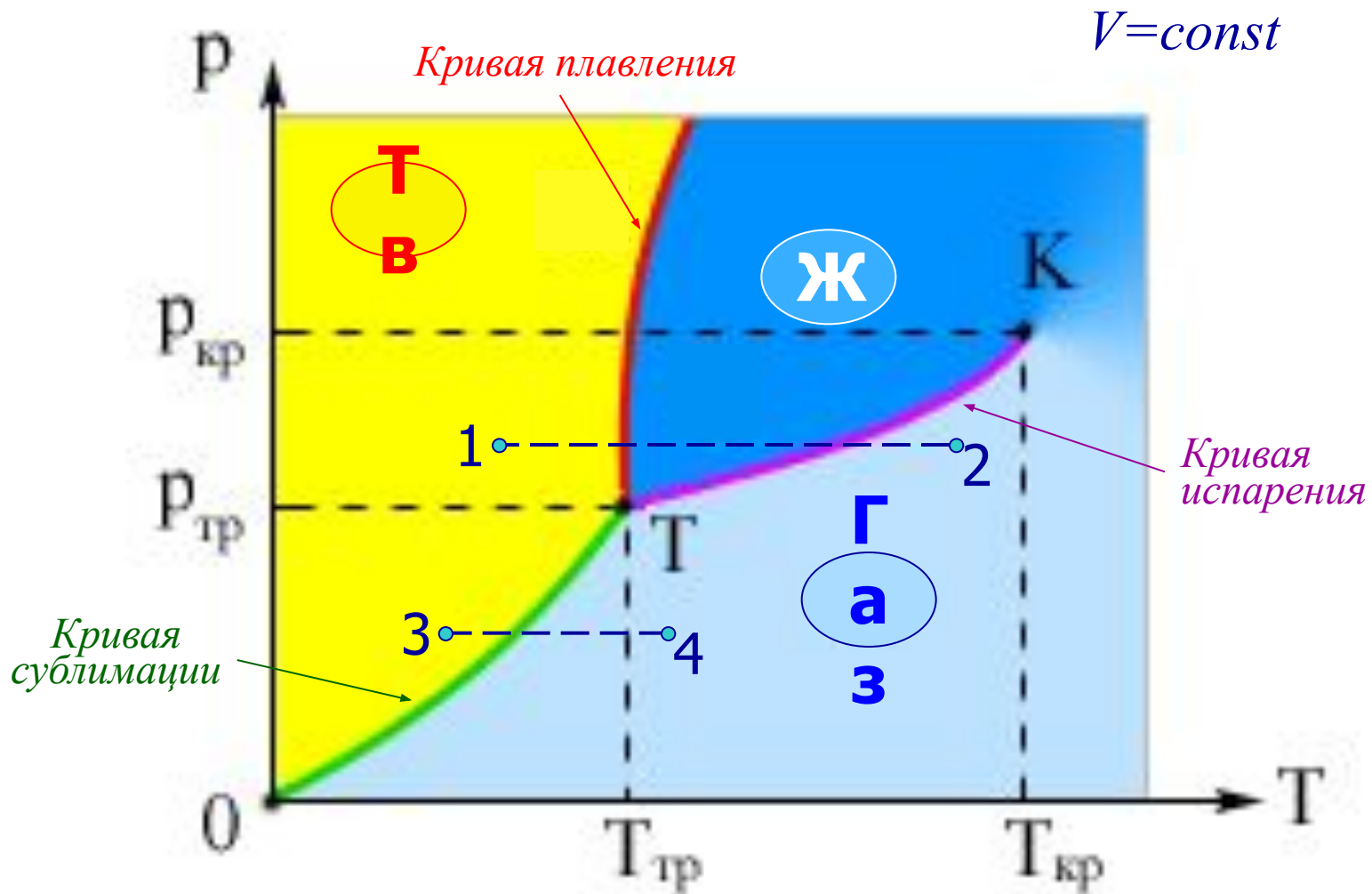
$$\frac{dp}{dT} = \frac{Lp}{RT^2}; \quad \frac{dp}{p} = \frac{L}{R} \frac{dT}{T^2}; \quad \ln p = -\frac{L}{R} \frac{1}{T} + \ln C$$

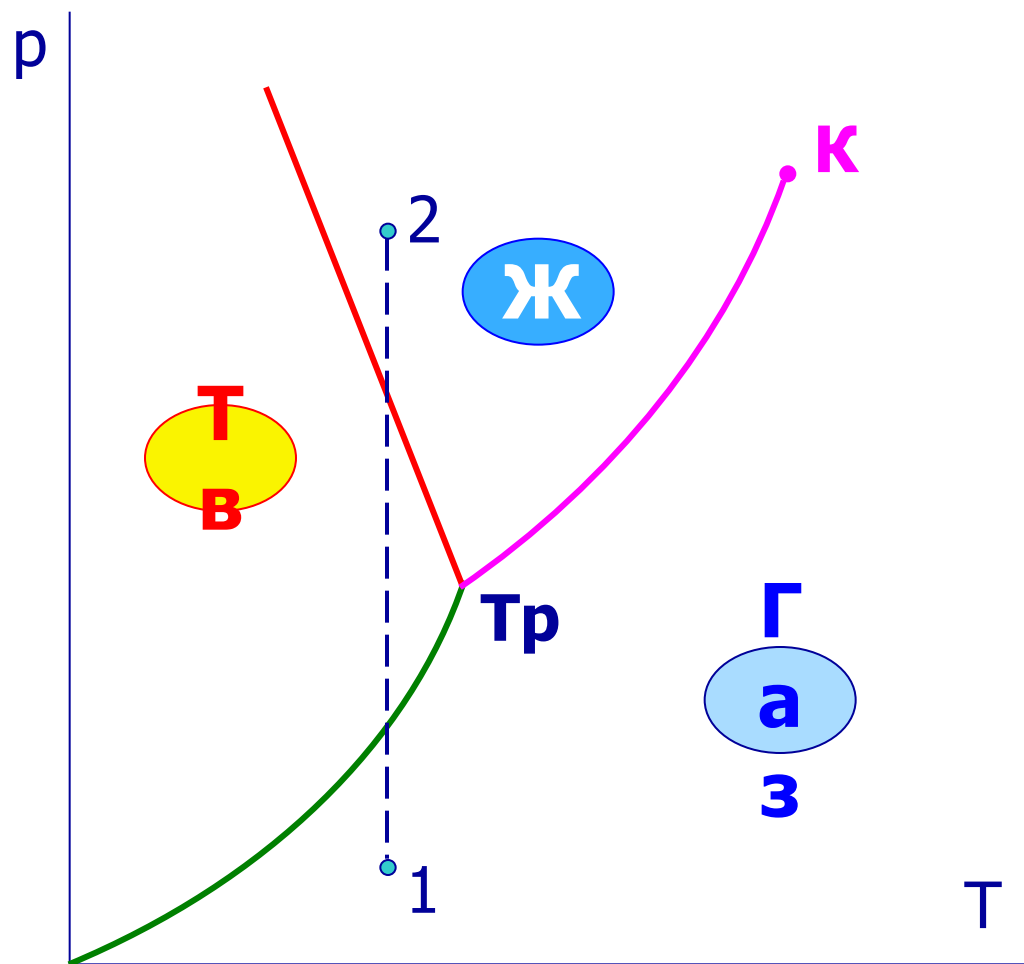
$$p = Ce^{-\frac{L}{RT}} \quad \text{- зависимость давления насыщенного пара от температуры}$$

Тема 5. Реальные газы. Жидкости . Твердые тела

§5.5. Тройная точка.
Диаграмма состояния

Диаграмма состояния

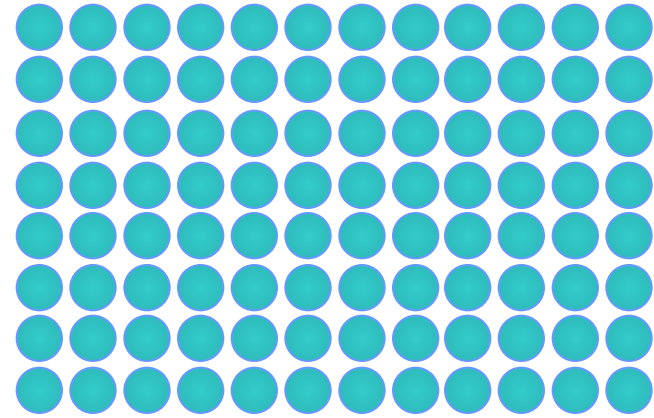
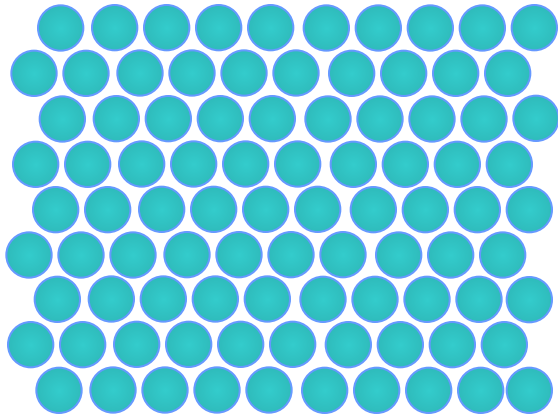




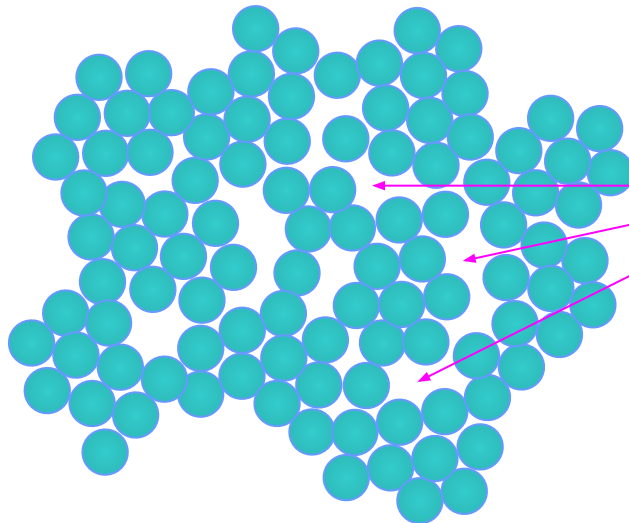
Тема 5. Реальные газы. Жидкости . Твердые тела

§5.6. Дырочная модель жидкости

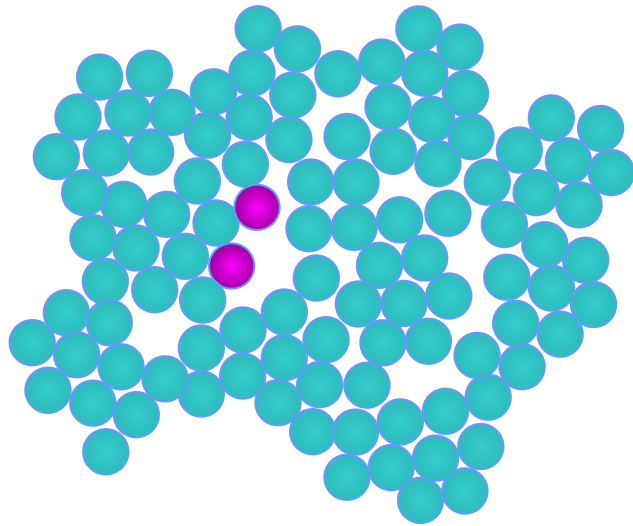
В кристаллах – дальний порядок



В жидкостях – ближний порядок



микроразрывы – «дырки»
($\sim 10\% V$)



τ – время оседлой жизни

$$\tau \sim 10^{-8} \text{ с}$$

τ_0 – средний период колебаний молекул около положения равновесия

$$\tau / \tau_0 \sim 10^3 - 10^5$$

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{W}{kT}}$$

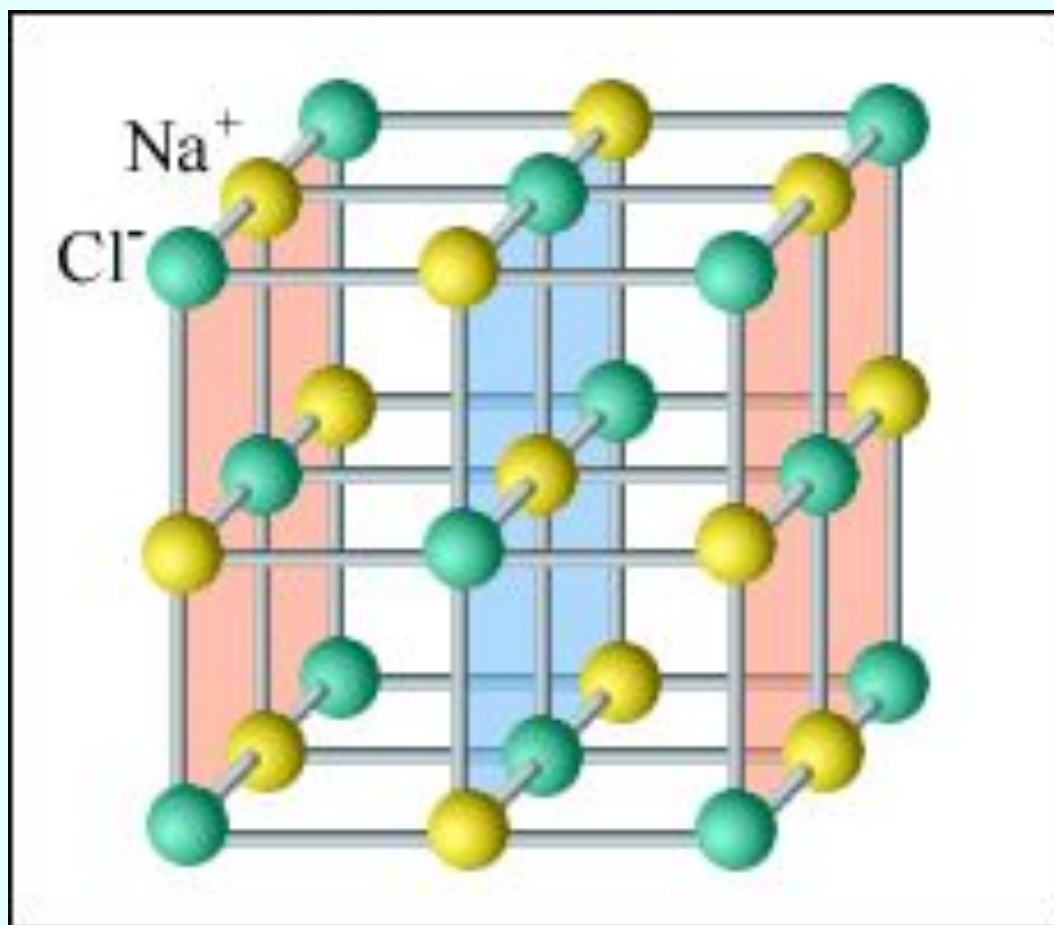
W – энергия активации

1. $t \gg \tau$ - перескоки в сторону действия силы: текучесть жидкости.
2. $t \ll \tau$ - жидкость ведет себя как упругая среда: сопротивляется не только изменению объема, но и формы.

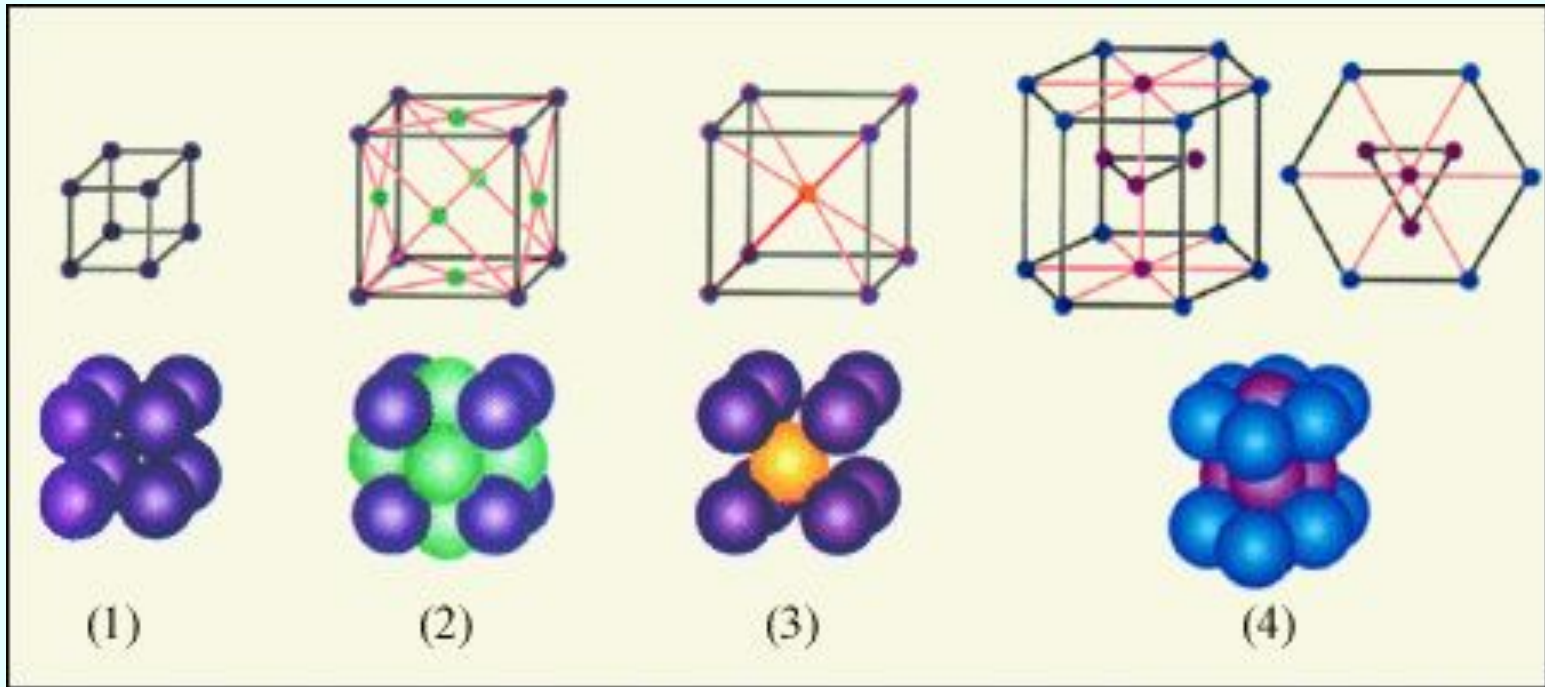
Тема 5. Реальные газы. Жидкости . Твердые тела

§5.7. Кристаллы.

Классическая теория теплоемкости кристаллов. Закон Дюлонга-Пти



Кристаллическая решетка поваренной соли



Простые кристаллические решетки:

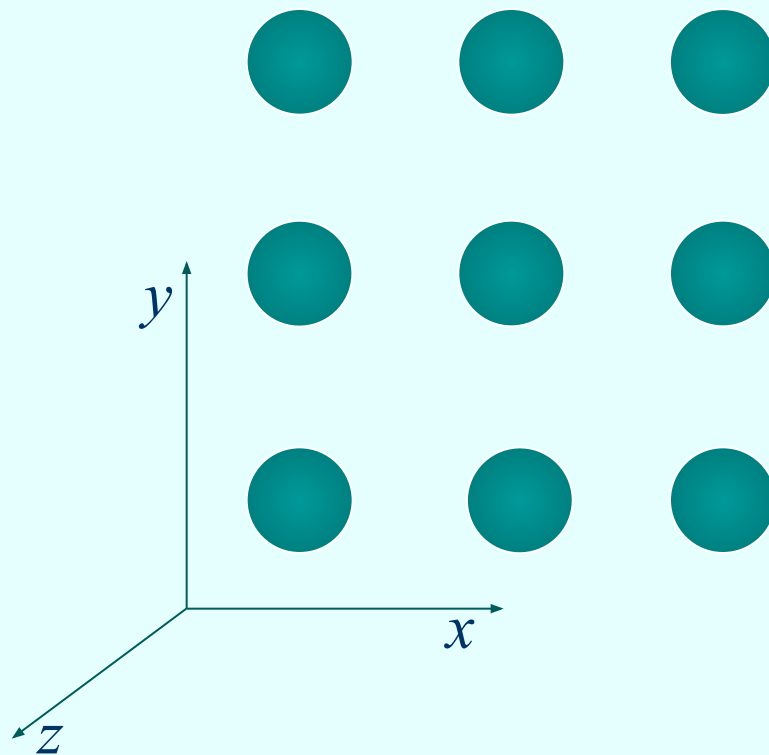
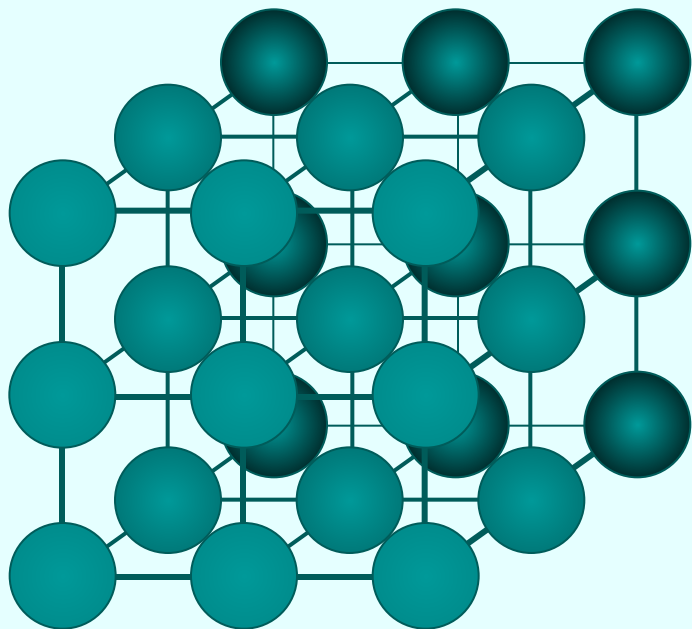
1 – простая кубическая решетка;

2 – гранецентрированная кубическая решетка;

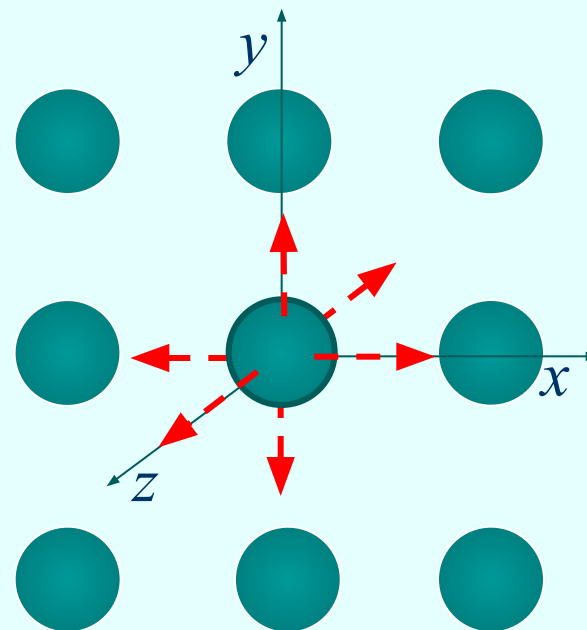
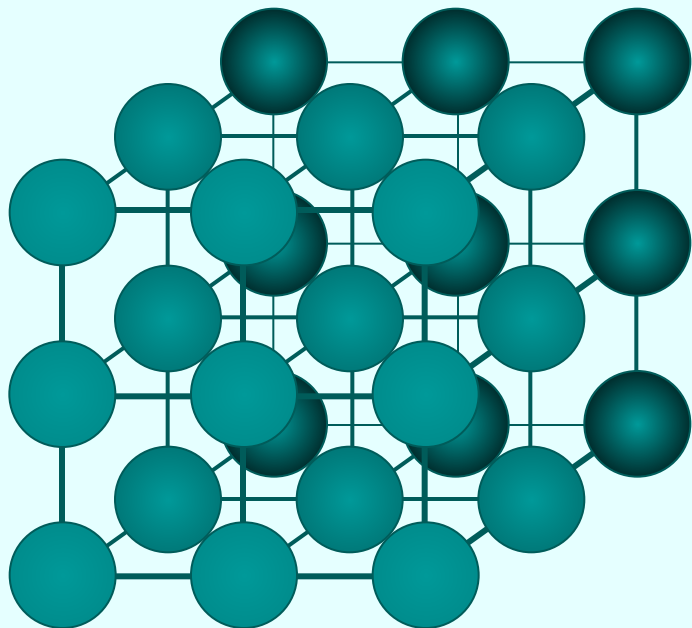
3 – объемноцентрированная кубическая решетка;

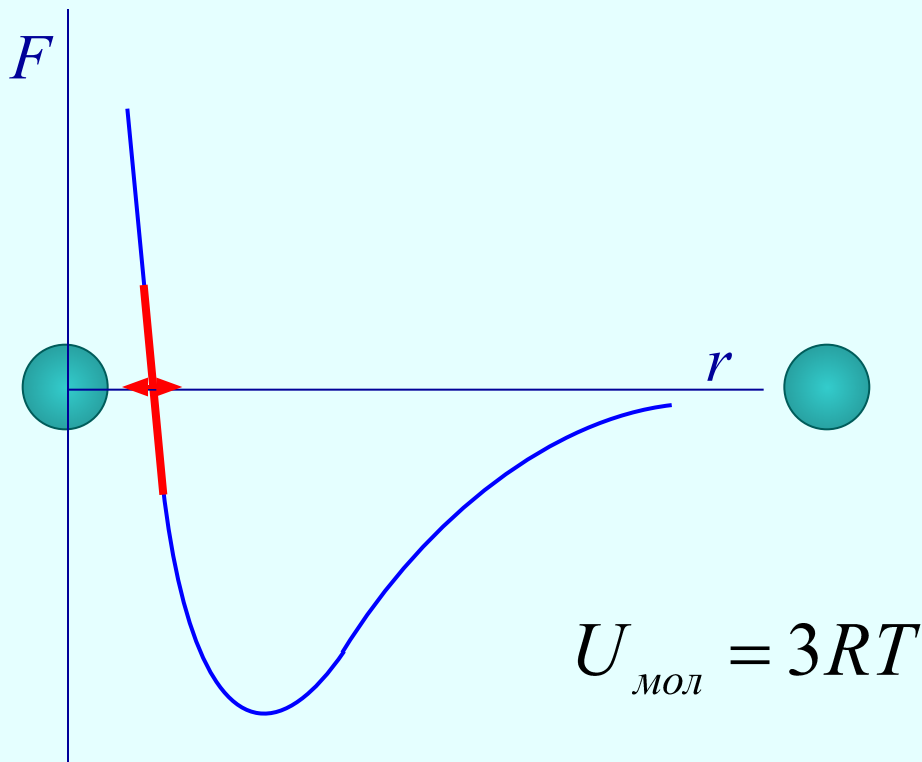
4 – гексагональная решетка.

Движение атомов в кристалле



Движение атомов в кристалле





$$\langle \varepsilon_{\text{кол}} \rangle = 2 \cdot \frac{3}{2} kT = 3kT$$

$$U_{\text{mol}} = N_A \cdot 3kT$$

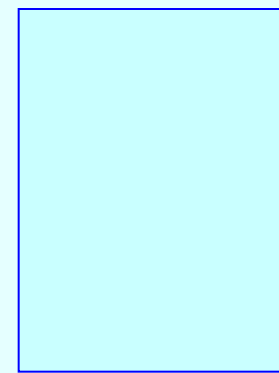
$$N_A \cdot k = R$$

$$c_V = \frac{dQ}{\nu dT} = \frac{dQ_{\text{mol}}}{dT} = \frac{dU_{\text{mol}}}{dT}$$

$c = 3R$ - закон Дюлонга
- Пти

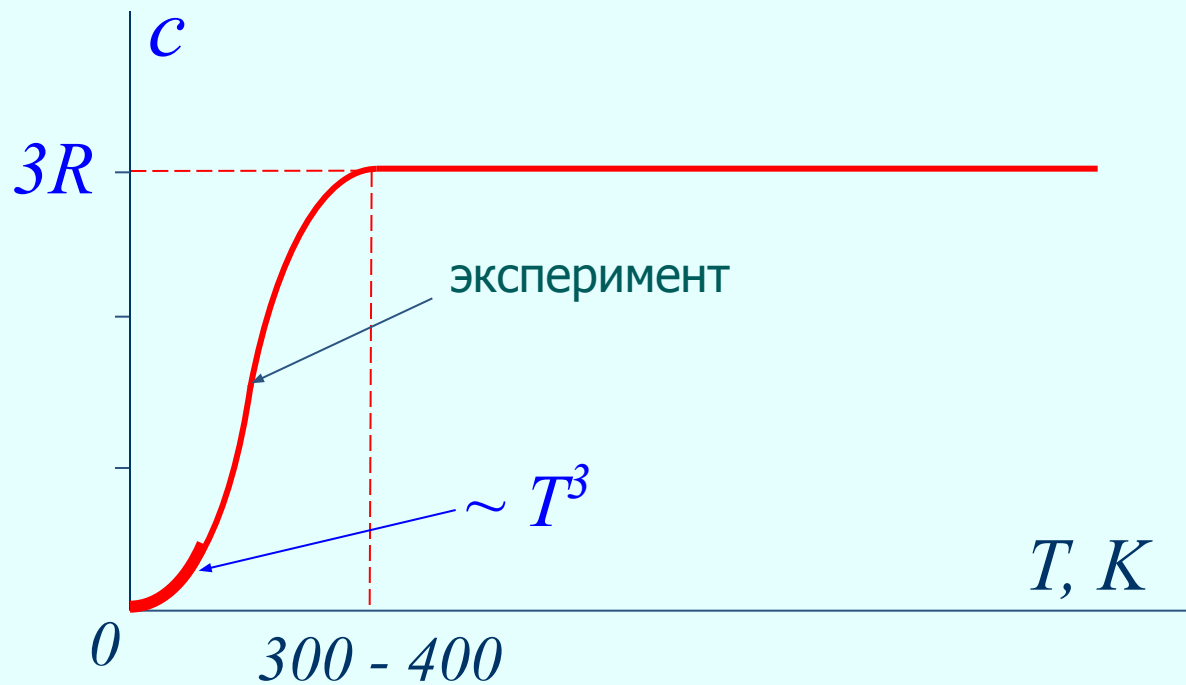


Дюлонг
Пьер Луи
(1785 – 1838)



Пти
Алекси Терез
(1791 – 1820)

$c = 3R$ - закон Дюлонга – Пти



КОНЕЦ ТЕМЫ