

Семестр 2 – Колебания. Молекулярная физика. Статистическая термодинамика.

Содержание (1)

Лекция Слайд

1	6
2	13
3	29
4	54
5	63
6	74
7	92
8	104
9	113
10	117

Содержание (2)

Лекция	Слайд
11	131
12	140
13	168
14	189
15	198

Литература

2 1 5 4

Основная литература:

1. Савельев И.В. Курс общей физики. т. 1 - М.: Наука. Физматлит, 1998.
2. Иродов И.Е. Механика (основные законы). М. С.-Пт., Физматлит, 2001.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. т. 3 - М.: Наука. Физматлит, 1998.
4. Иродов И.Е. Физика макросистем (основные законы). М. С.-Пт., Физматлит, 2001.

Дополнительная литература:

1. Пригожин И., Стенгерс И. - Порядок из хаоса. М.: Эдиториал УРСС, 2000.
2. Пригожин И., Кондепуди Д. - Современная термодинамика. М.: Мир, 2002.
3. Сивухин Д. В. - Общий курс физики, т.2, Термодинамика и молекулярная физика, М.: Наука, 1990.
4. Матвеев А. Н. - Молекулярная физика, М.: Высшая школа, 1987.
5. Дубовик В.М. - Колебания и их Представление на фазовой плоскости. М.: МИФИ, 1994.
6. Дубовик В.М. - Специальные главы раздела " Колебания и волны". М.: МИФИ, 1987.

Лекция 1 (1)

1. Введение. Математическая пропедевтика. Комплексные числа. Линейные дифференциальные уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами.
2. Колебания. Общее выражение для энергии консервативной системы с одной степенью свободы. Обобщенная координата.
3. Устойчивое положение равновесия. Малые колебания. Гармонические колебания.

Лекция 1 (2)

4. Одномерный гармонический осциллятор. Закон сохранения энергии и уравнение движения. Математический и физический маятники.

5. Демонстрации: Int2, Oscillation Rus.

Колебания пружинного маятника

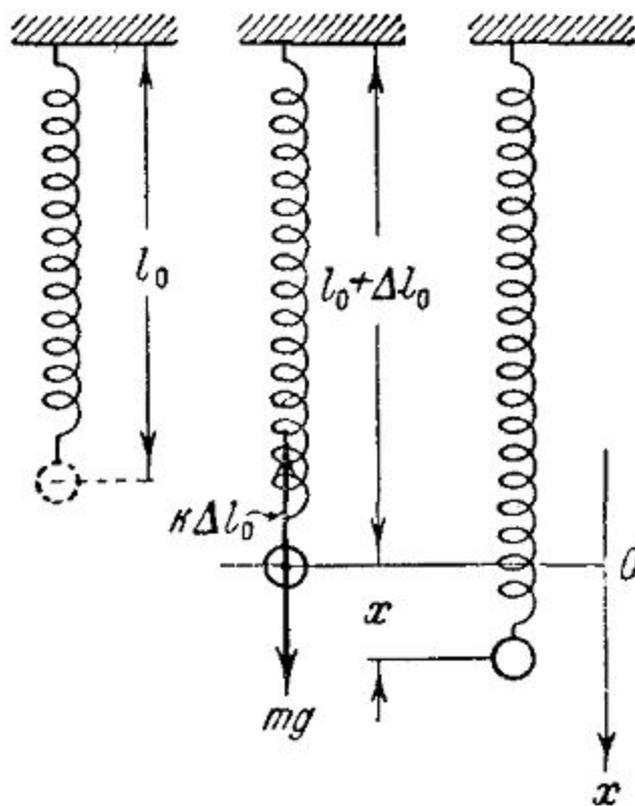


Рис. 162.

Потенциальная энергия пружинного маятника

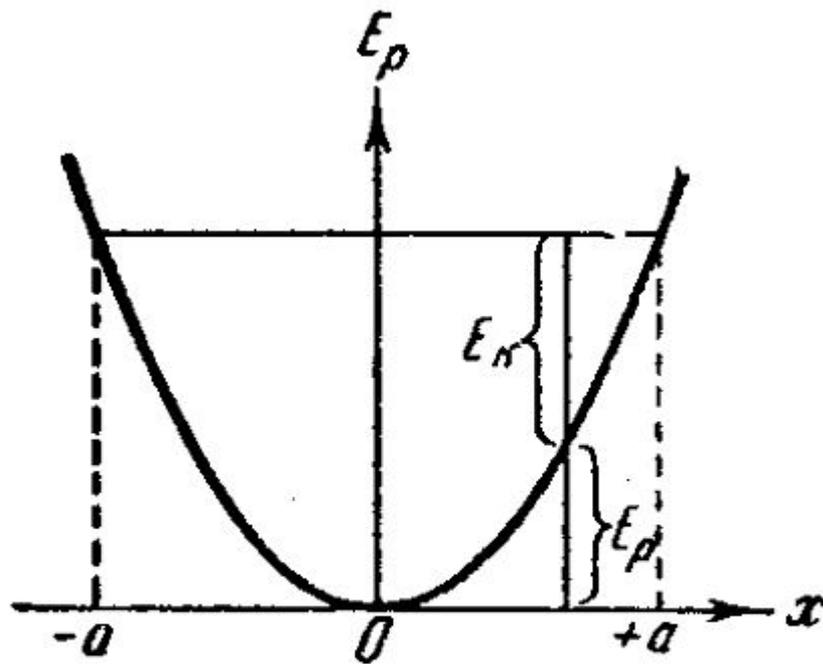


Рис. 163.

Зависимость смещения x маятника от
времени t

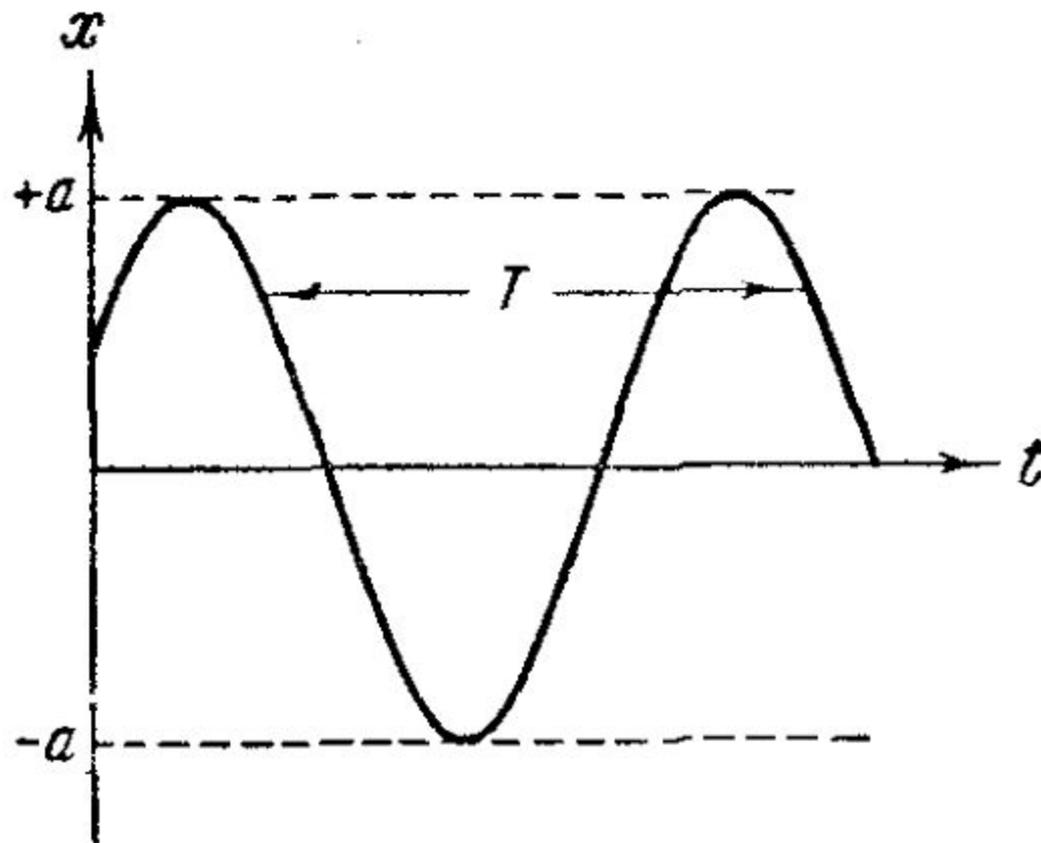
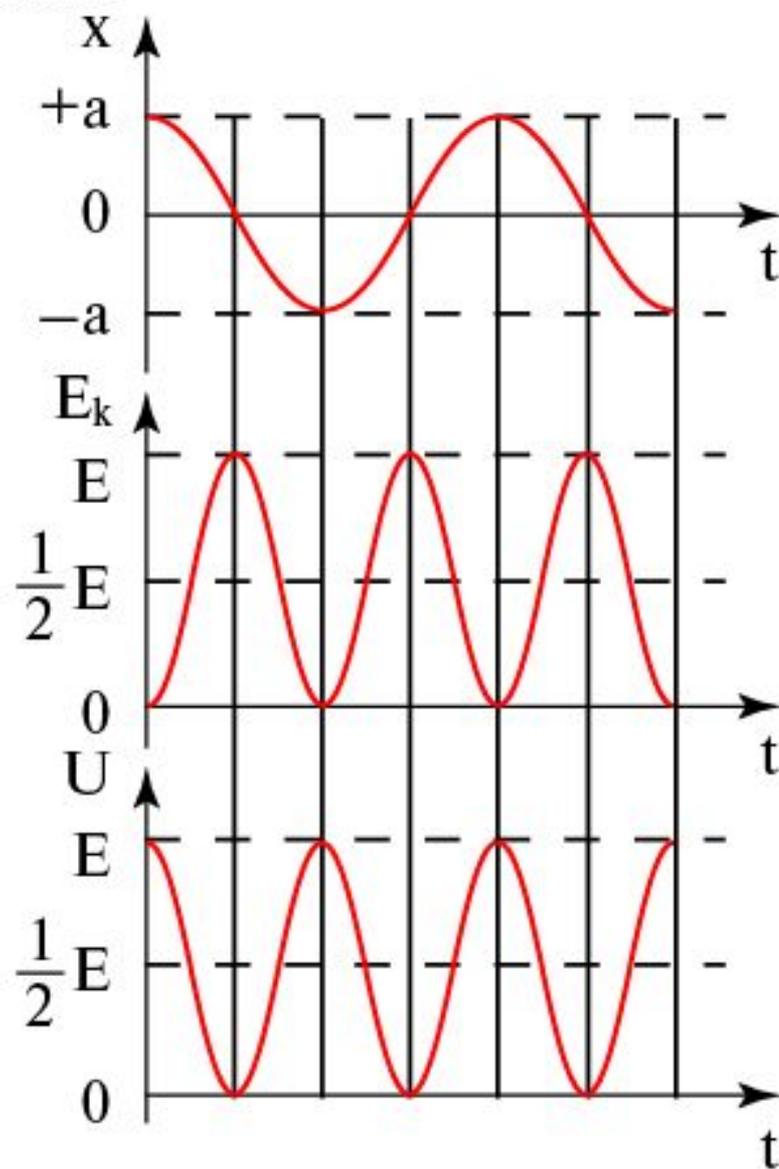
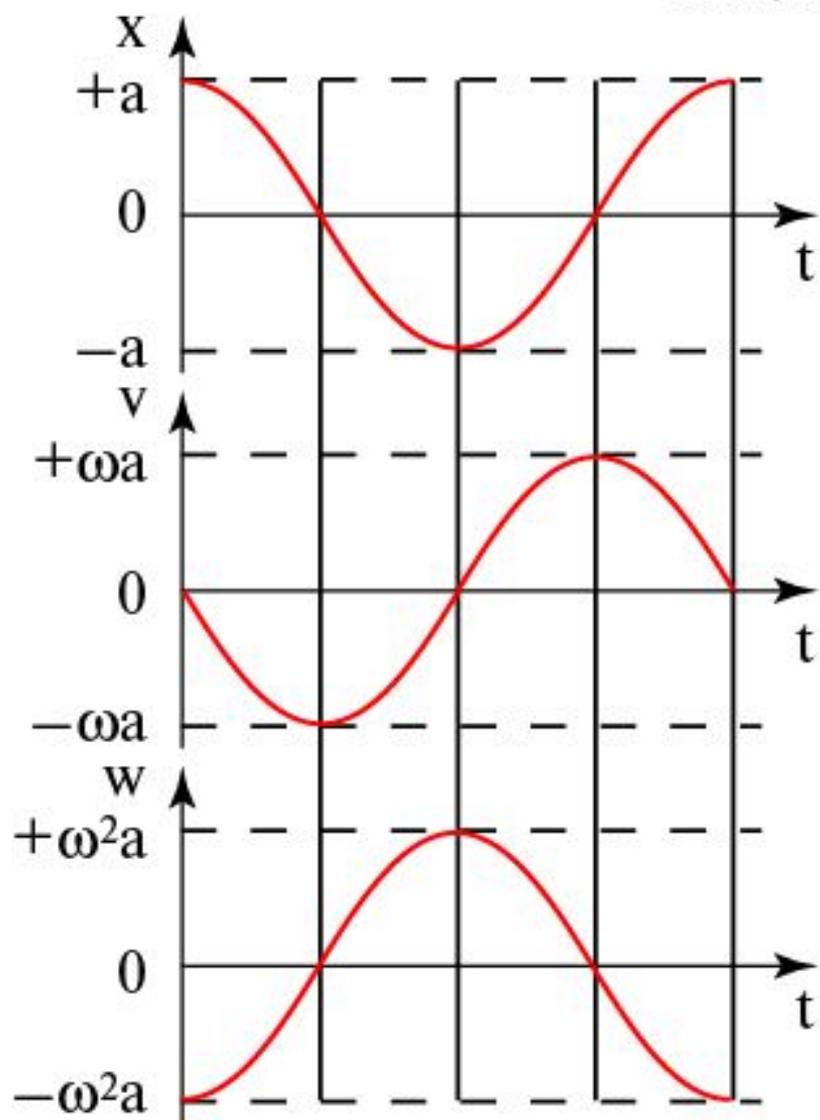
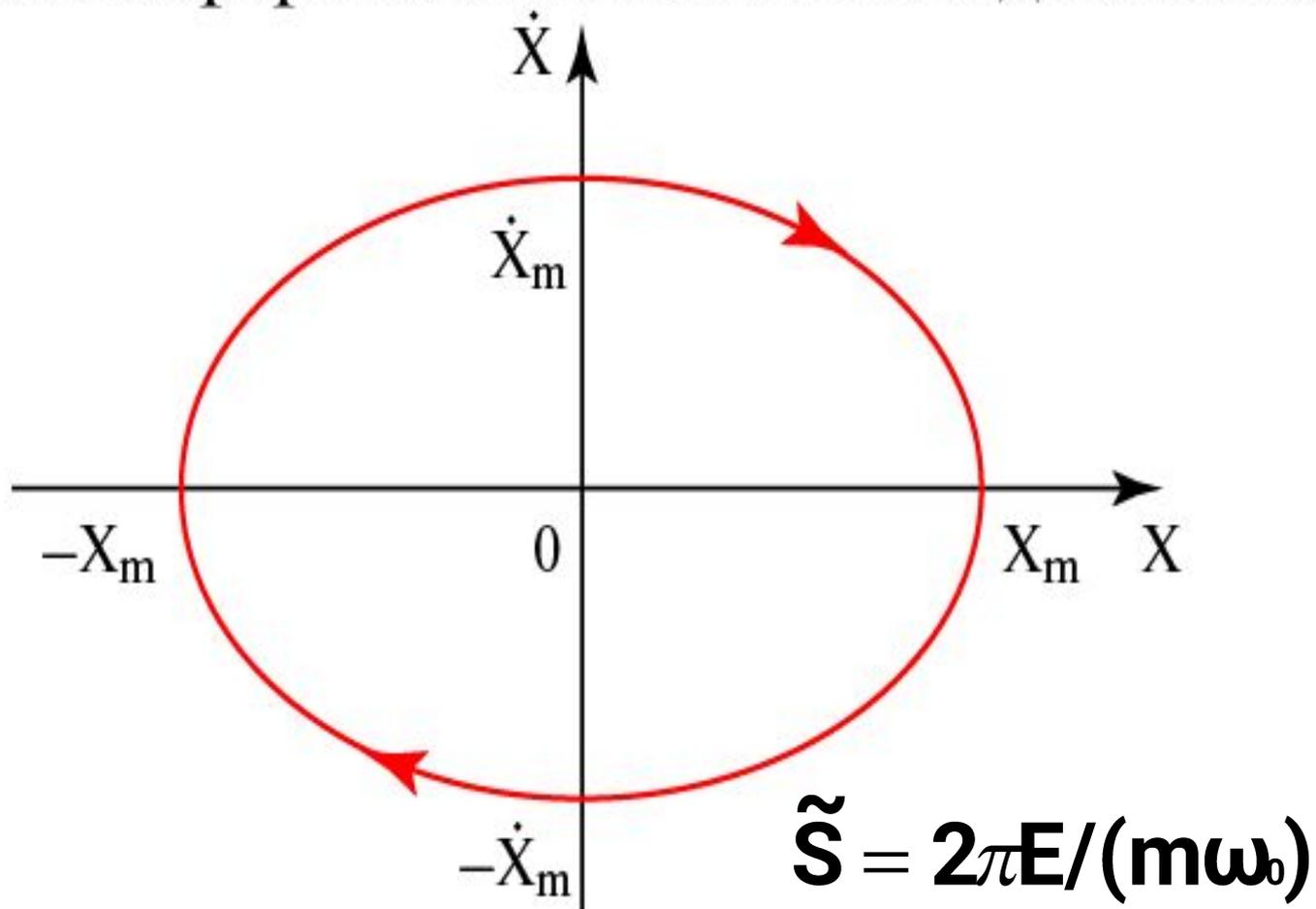


Рис. 164.

Характеристики гармонических свободных колебаний



Фазовые портреты колебательного движения (1)



Свободные гармонические колебания

Лекция 2.

1. Сложение колебаний одного направления. Векторная диаграмма. Биения. Представление колебаний на фазовой плоскости.

2. Взаимно-перпендикулярные колебания осциллятора.

3. Представление колебаний на фазовой плоскости.

4. Решение уравнения движения системы, совершающей свободные затухающие колебания.

5. Коэффициент затухания. Частота свободных затухающих колебаний. Логарифмический декремент затухания. Добротность колебательной системы.

Гармонические колебания (1)

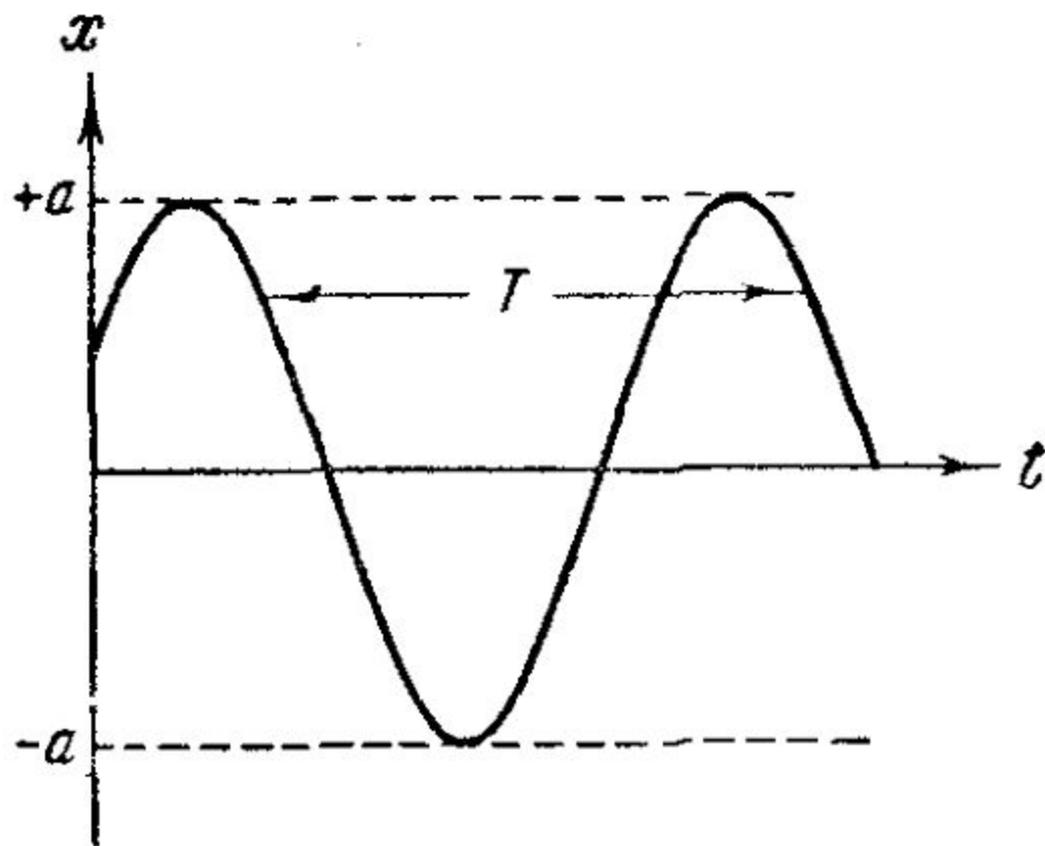


Рис. 164.

Гармонические колебания (2)

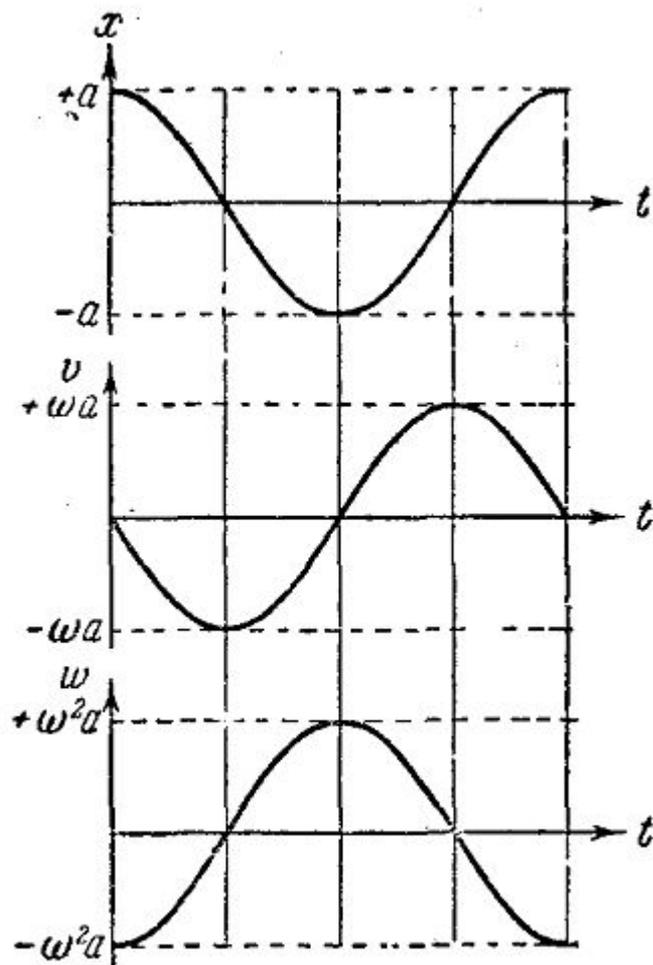


Рис. 165.

Фазовый портрет гармонических колебаний

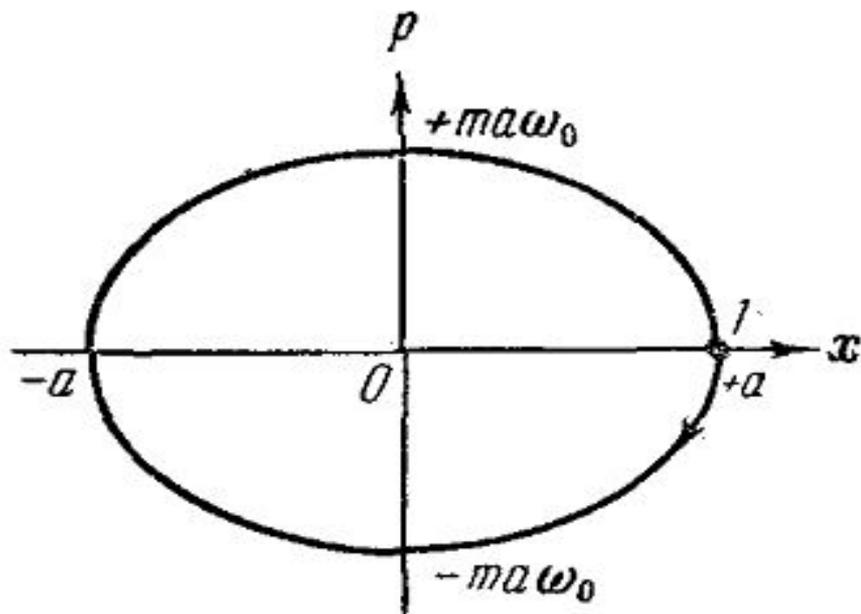


Рис. 167.

Плотность вероятности dw/dx для гармонического осциллятора

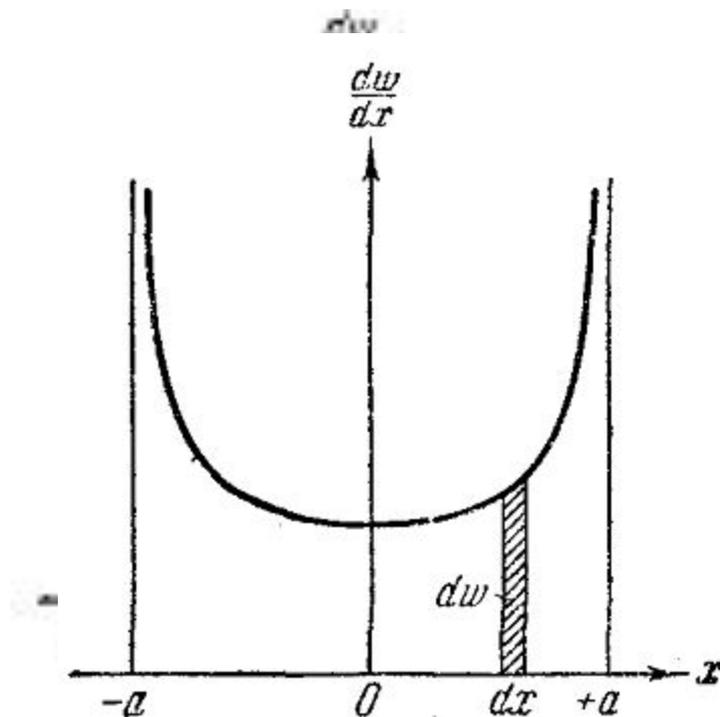


Рис. 168.

Колебания математического маятника

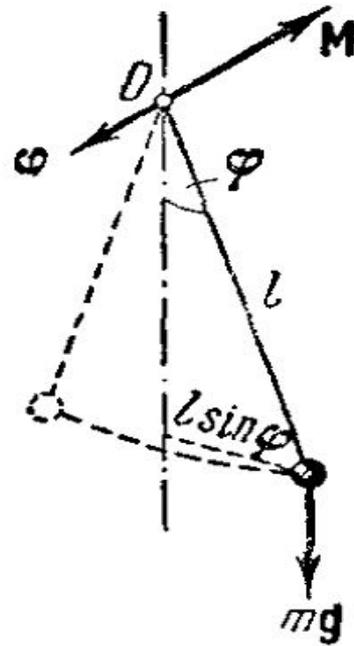


Рис. 169.

Колебания физического маятника

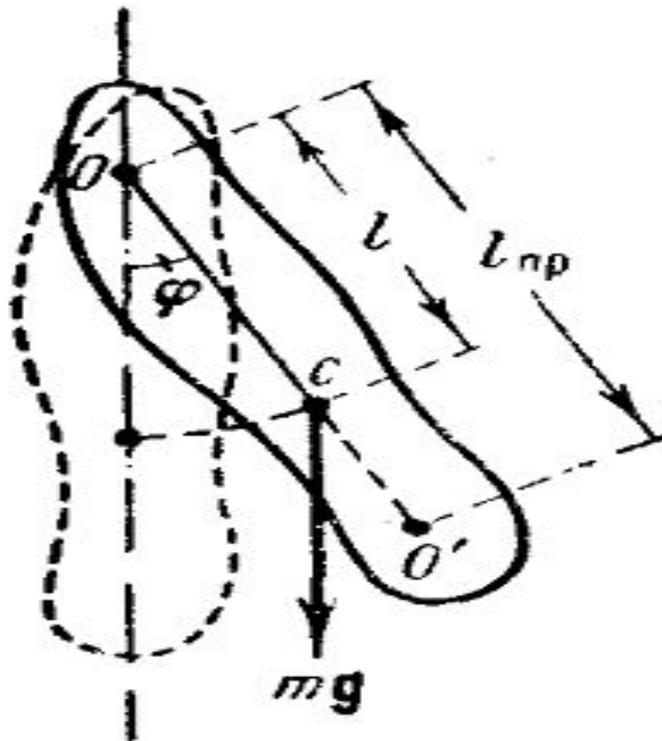


Рис. 170.

Двумерные колебания пружинного маятника

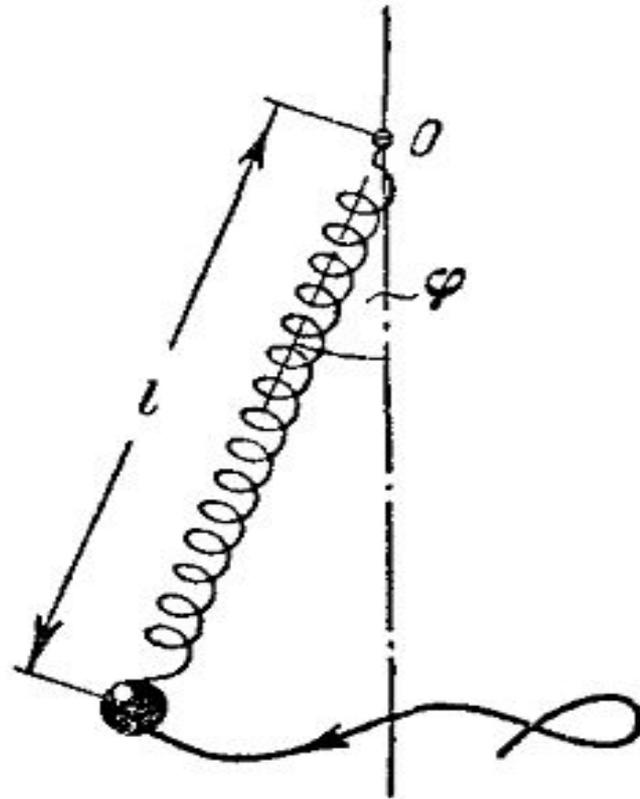


Рис. 175.

Фазовая диаграмма (1)

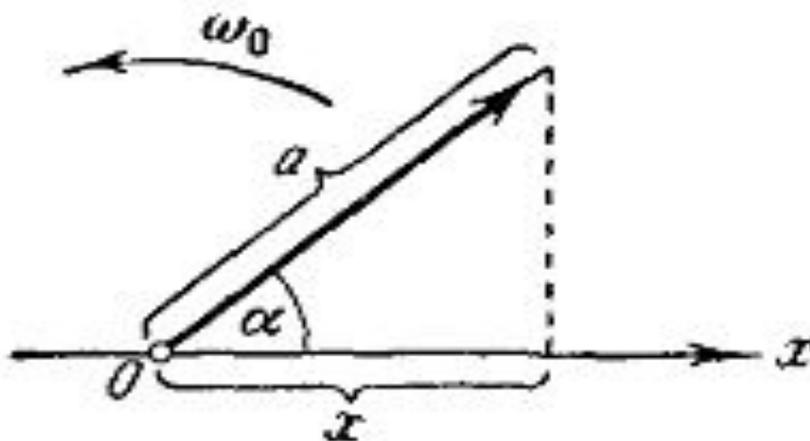


Рис. 171.

Фазовая диаграмма (2)

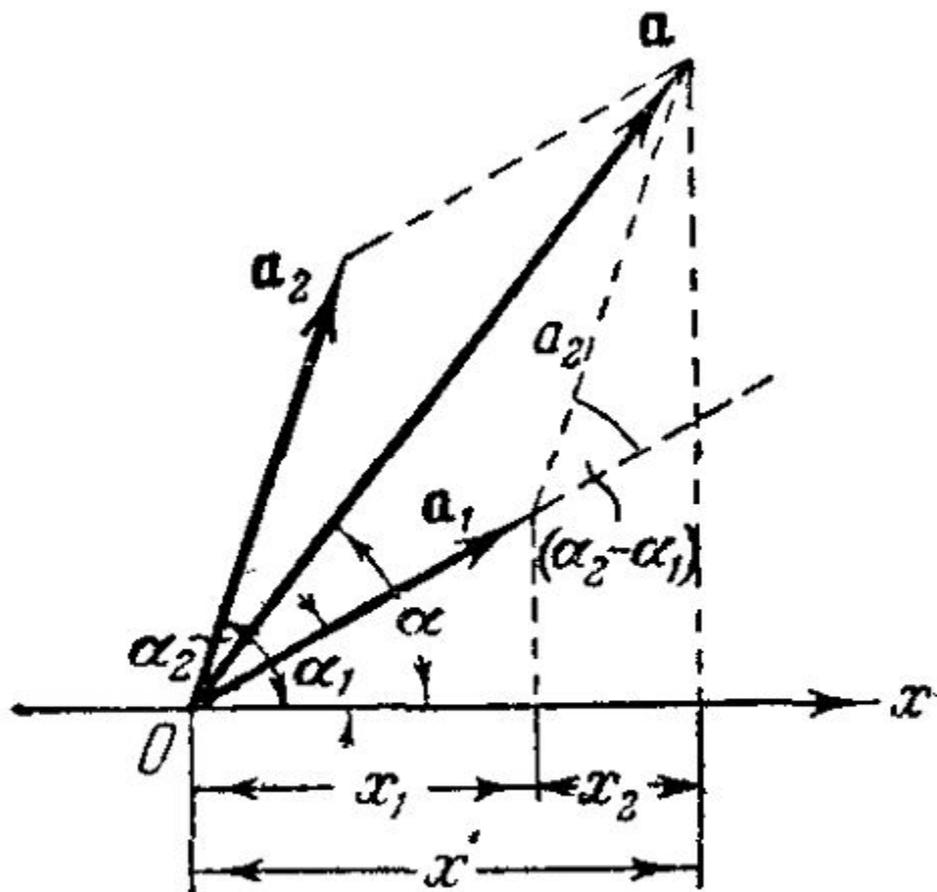
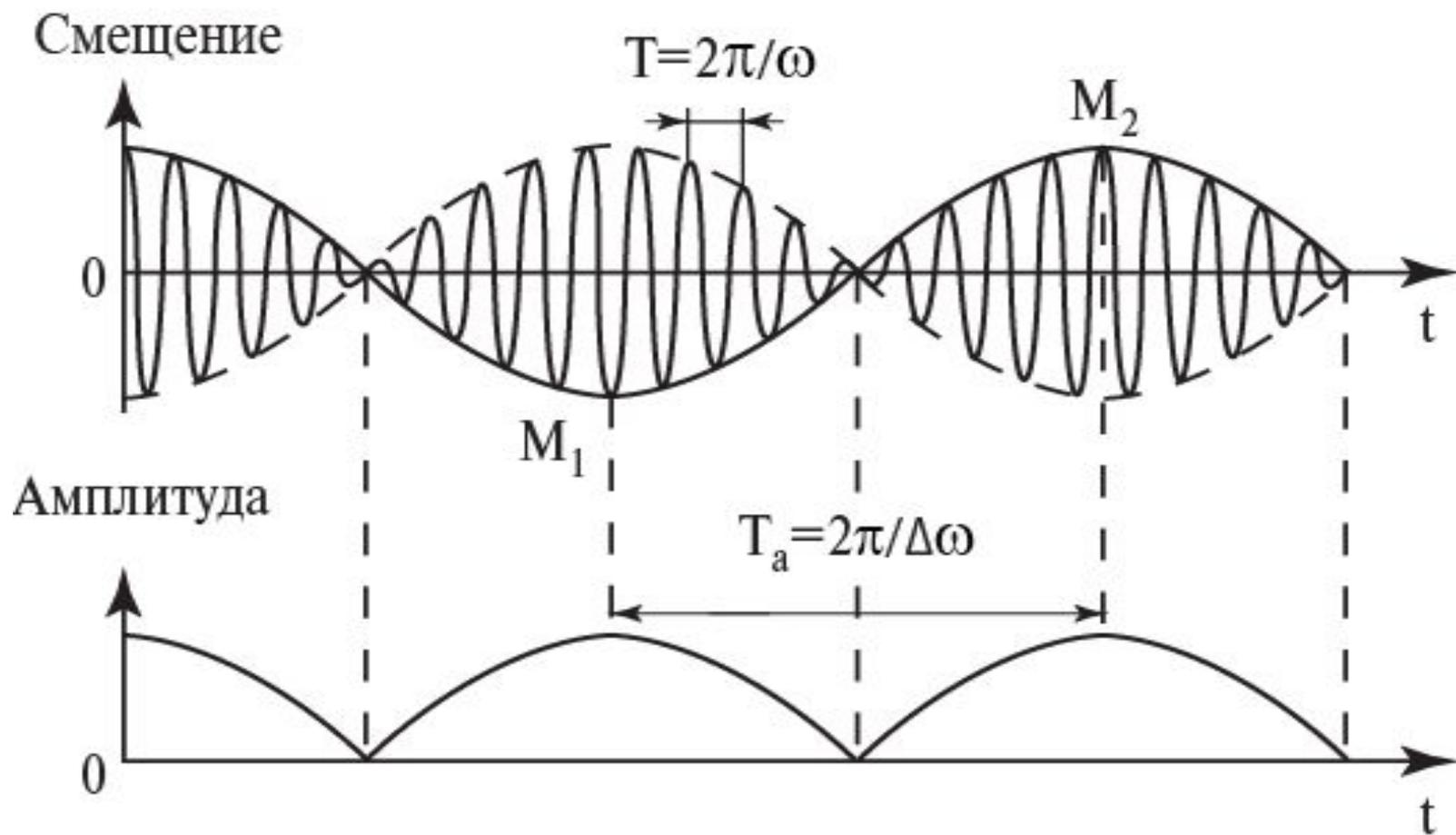


Рис. 172.

Биения



К зависимости амплитуды биений от времени

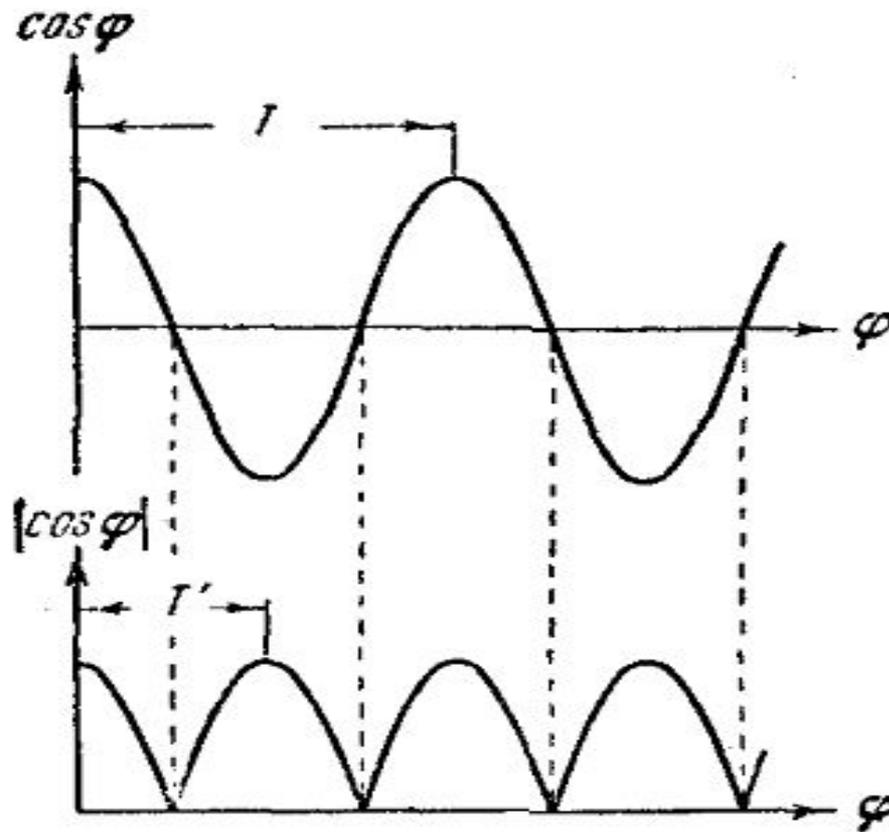


Рис. 174.

Сложение взаимно-перпендикулярных колебаний (1)

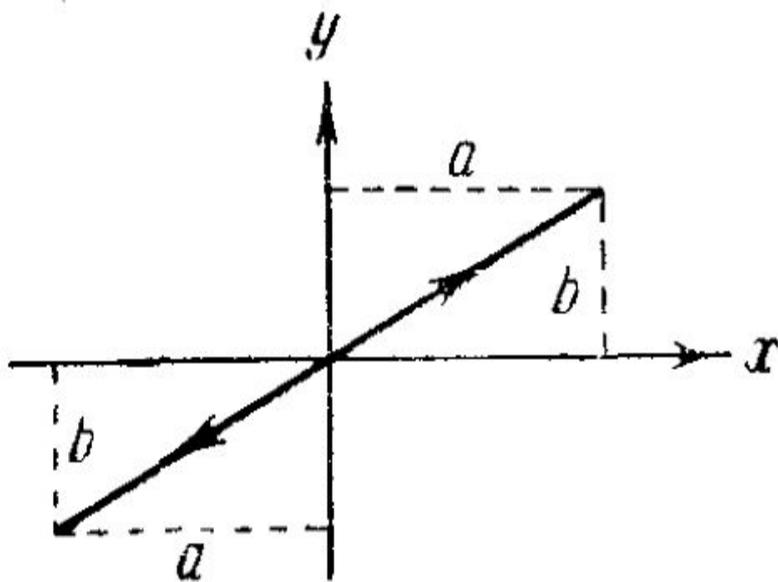


Рис. 176.

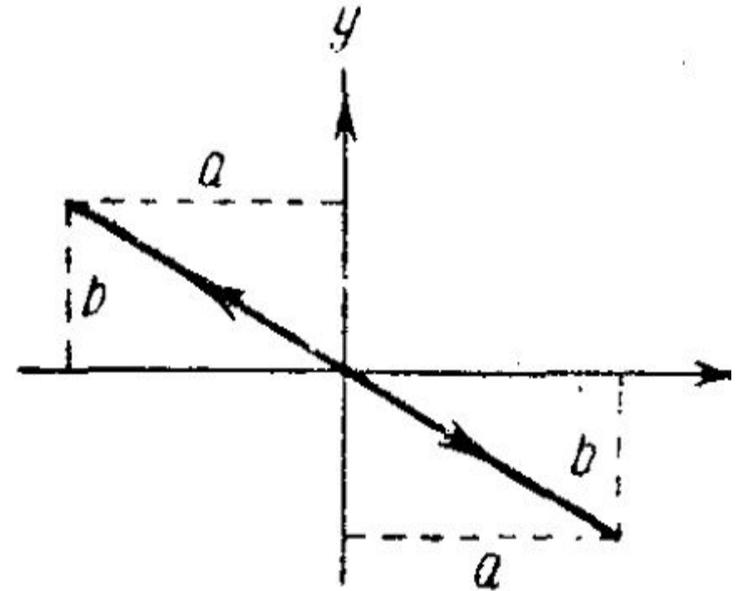


Рис. 177.

Сложение взаимно-перпендикулярных колебаний (2)

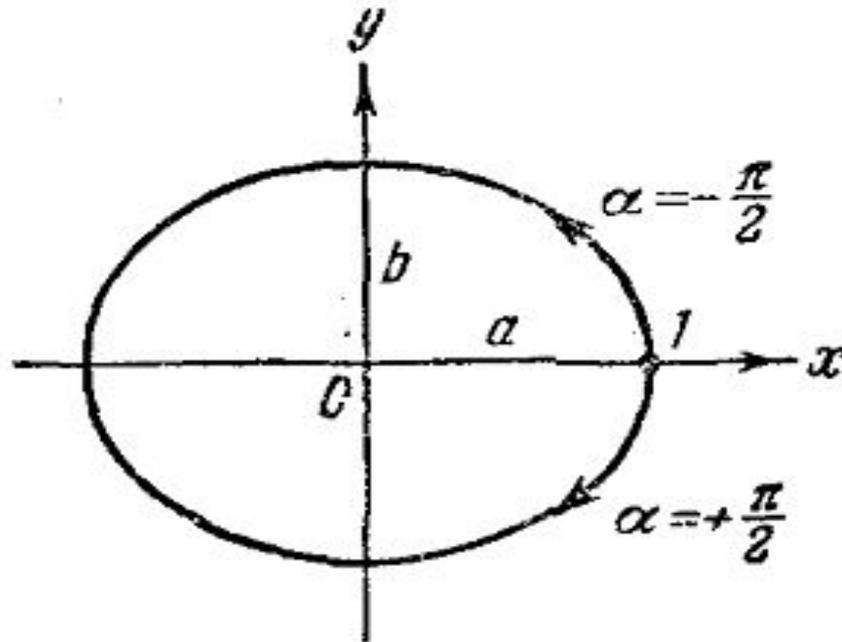


Рис. 178.

Фигуры Лиссажу (1)

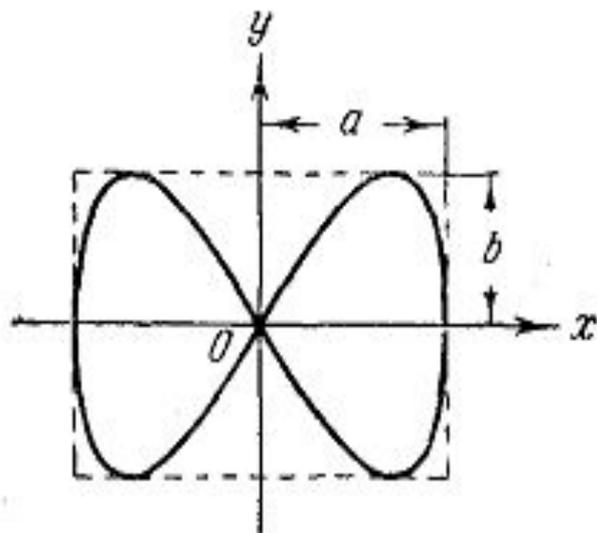


Рис. 179.

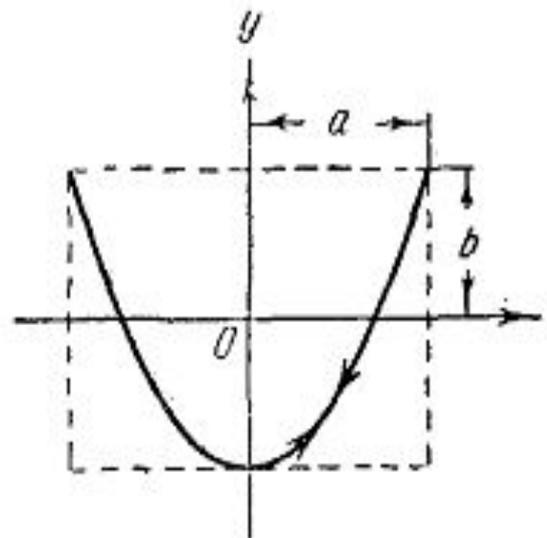


Рис. 180.

Фигуры Лиссажу (2)

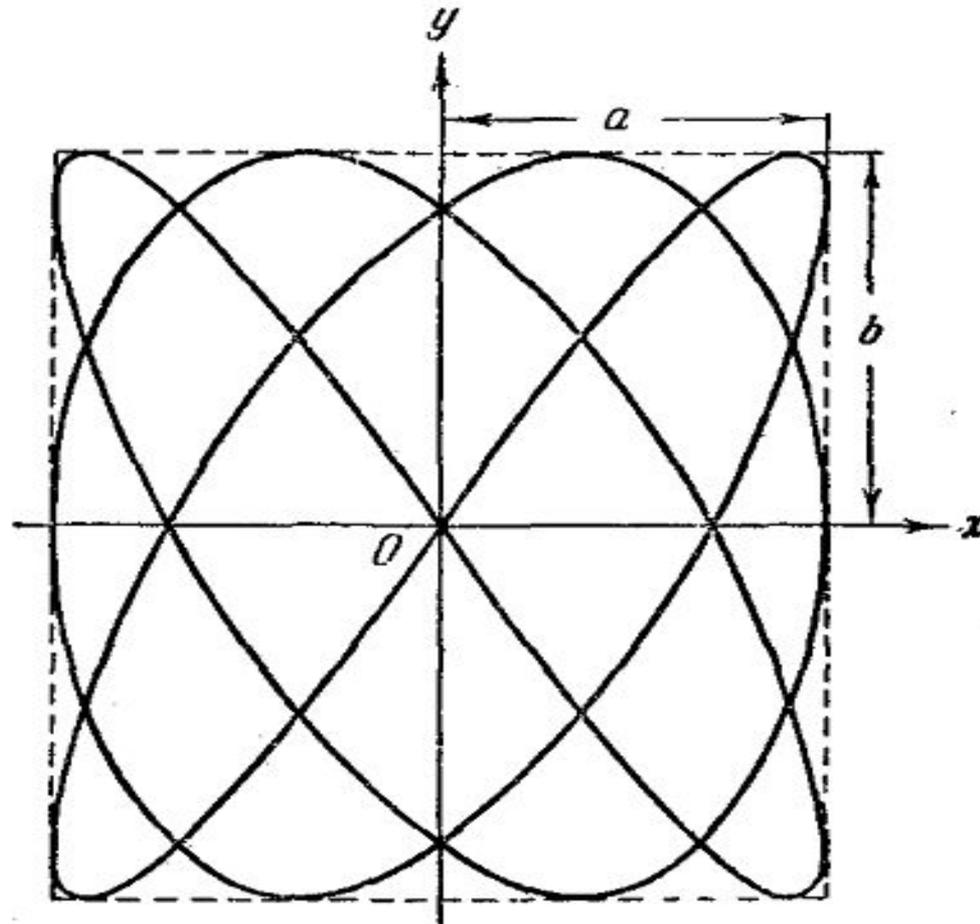
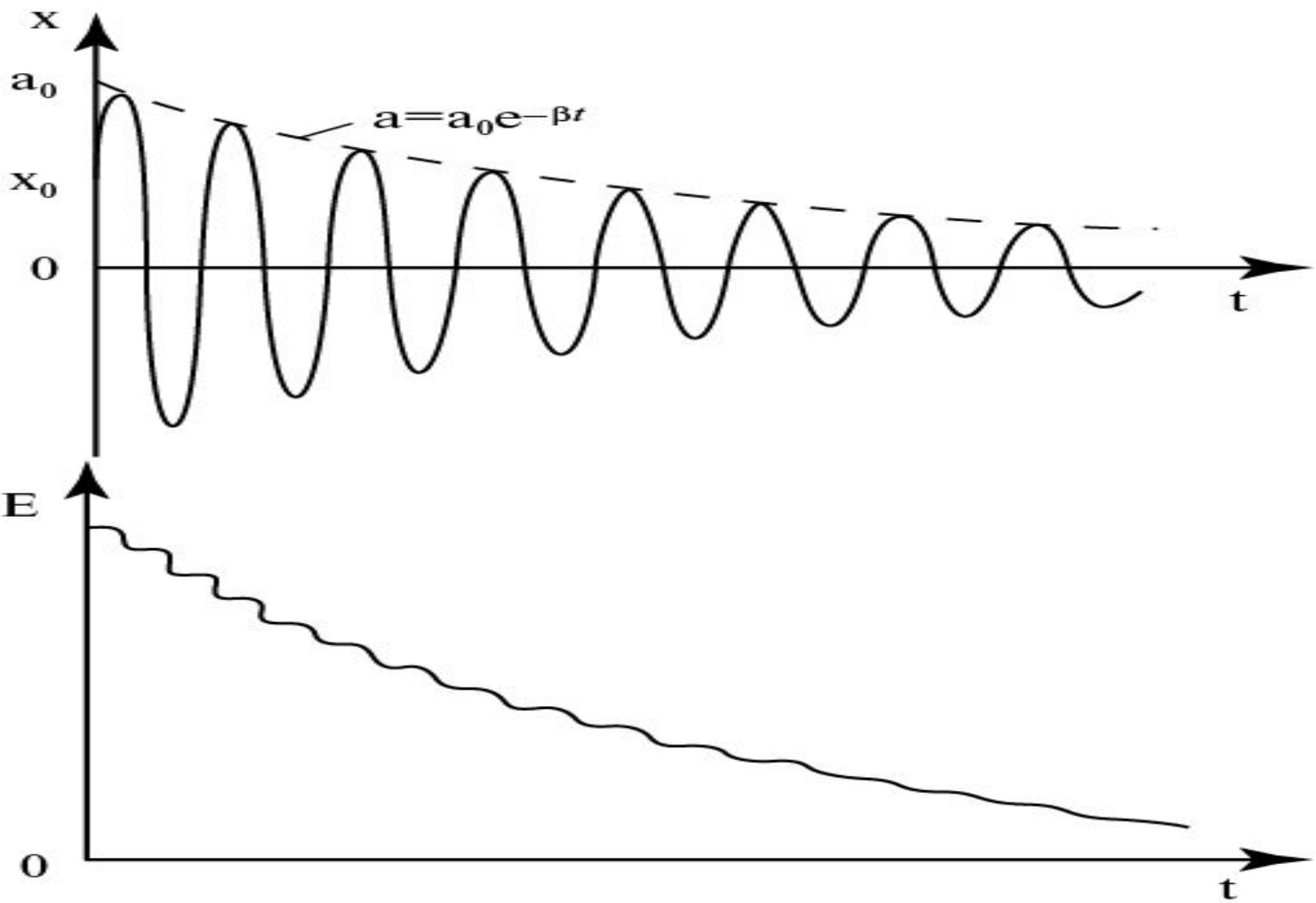


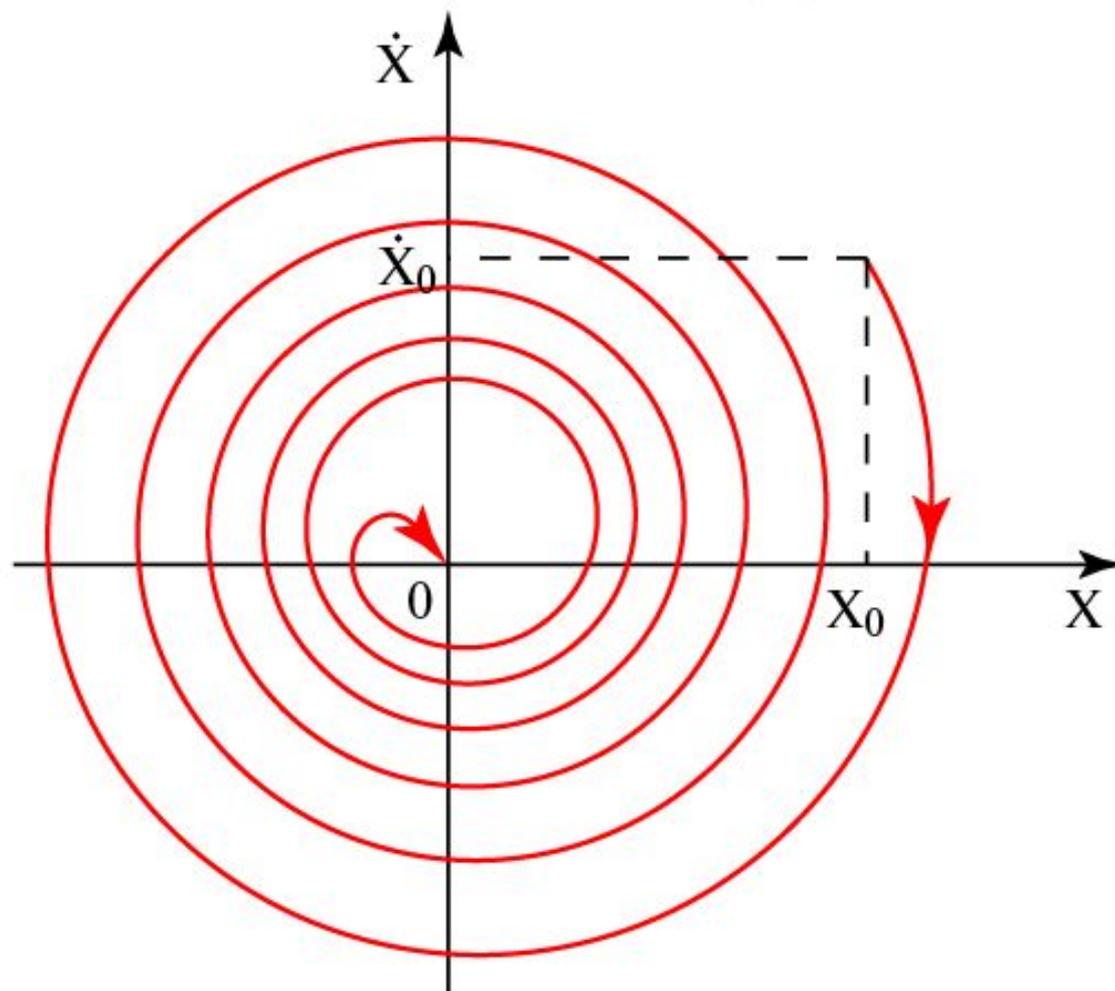
Рис. 181.

Лекция 3

1. Зависимость энергии затухающих колебаний от времени.
2. Аперриодическое движение маятника.
3. Решение уравнения движения системы, совершающей вынужденные колебания. Резонанс смещения, скорости и ускорения. Резонансные кривые (АЧХ и ФЧХ).
4. Автоколебания.
5. Нелинейные колебания физического маятника. Бифуркация. Сепаратриса. Аттрактор.
6. Демонстрации: Int2. Oscillation Rus.

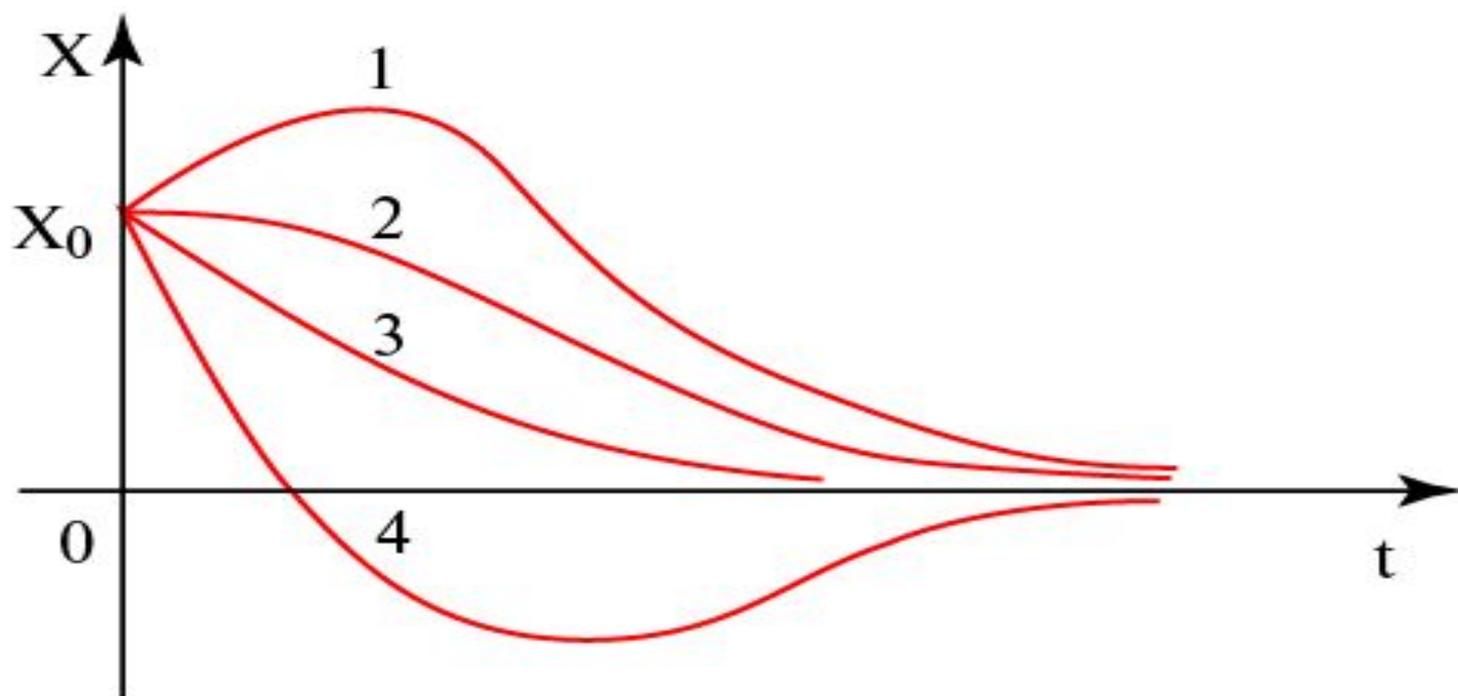


Фазовые портреты колебательного движения (2)



Свободные гармонические затухающие колебания

Зависимость смещения X от времени t для критического затухания



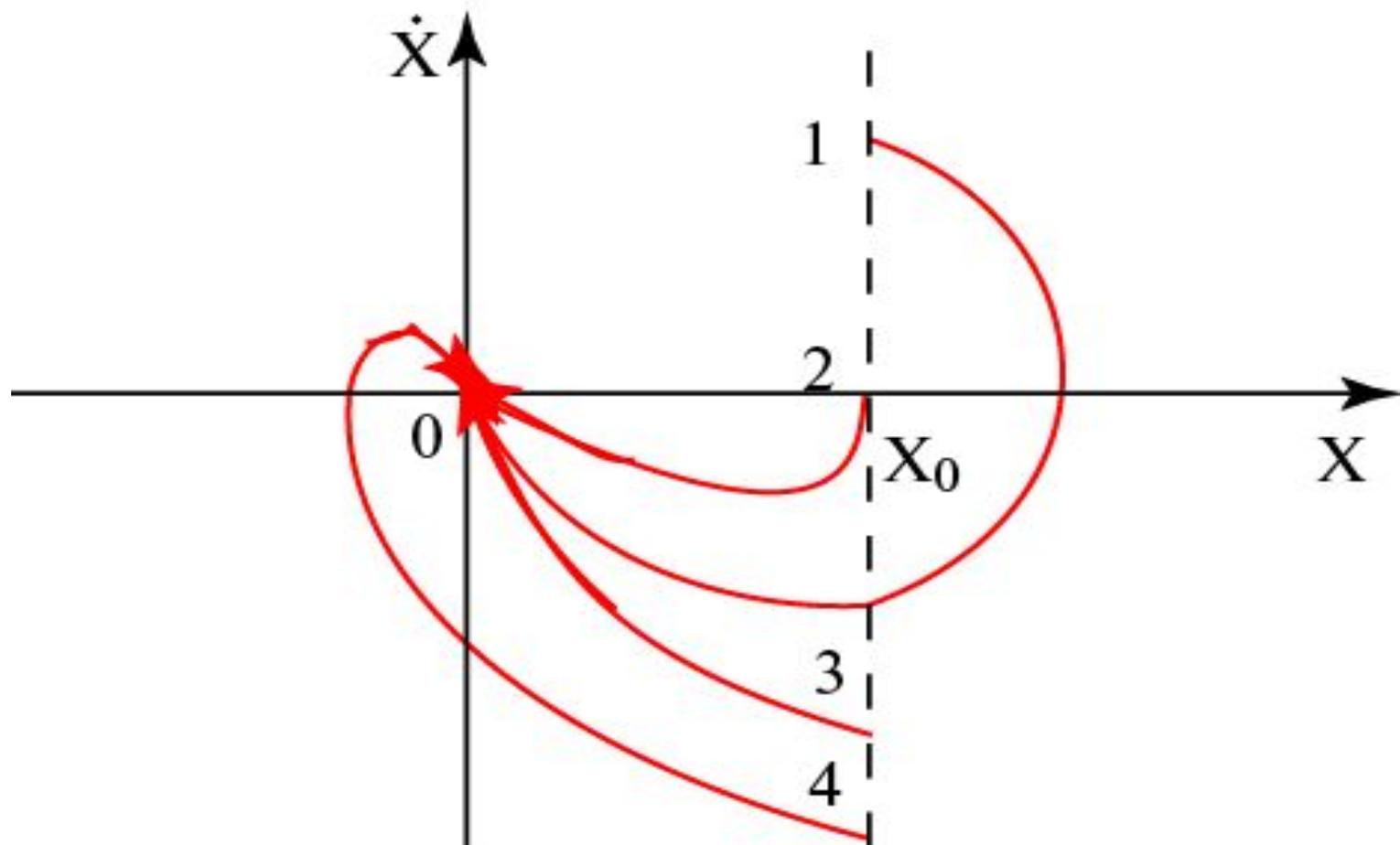
1) $X_0 > 0$, $\dot{X}_0 > 0$;

2) $X_0 > 0$, $\dot{X}_0 = 0$;

3) $X_0 > 0$, $-X_0(\beta + \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}) < \dot{X}_0 < 0$;

4) $X_0 > 0$, $\dot{X}_0 < -X_0(\beta + \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2})$.

Фазовый портрет для критического затухания



Сложение взаимно-перпендикулярных колебаний (1)

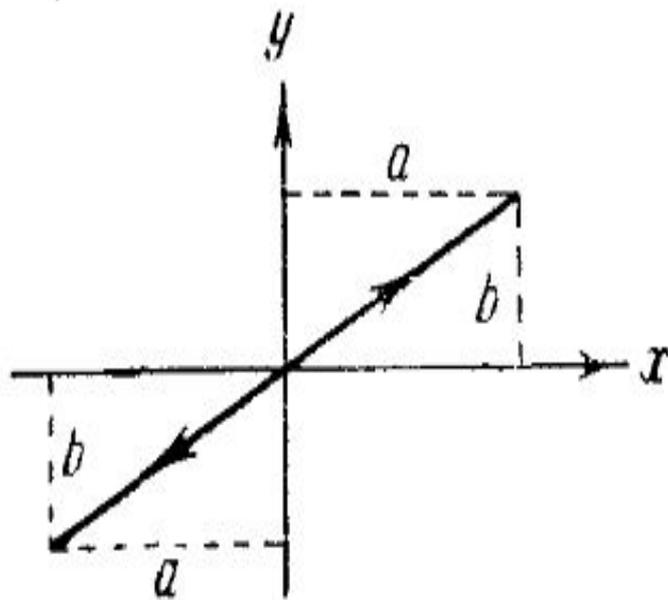


Рис. 176.

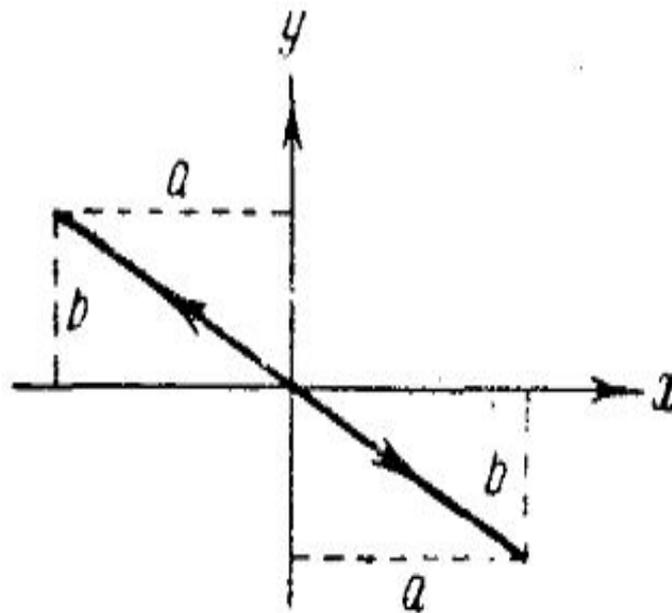


Рис. 177.

Сложение взаимно-перпендикулярных колебаний (2)

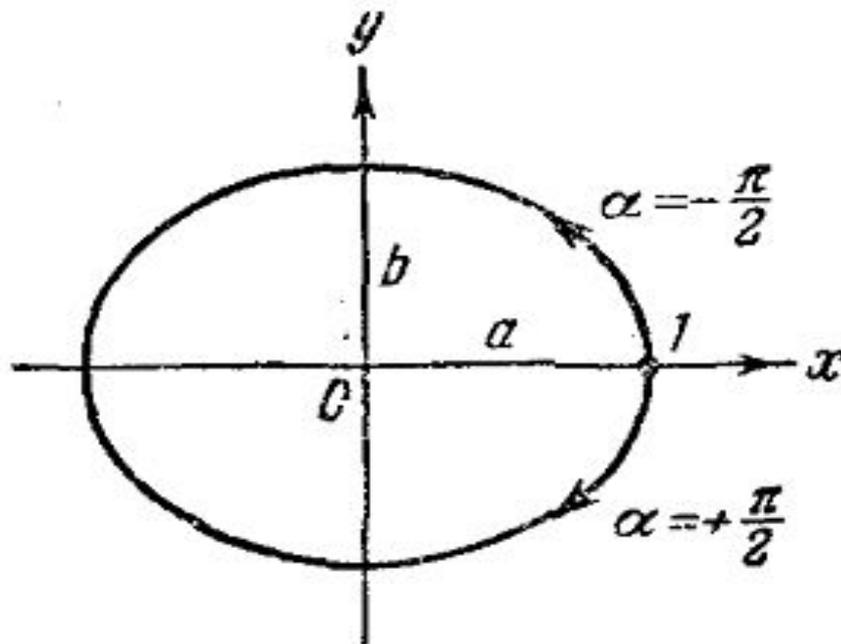


Рис. 178.

Сложение взаимно-перпендикулярных колебаний (3)

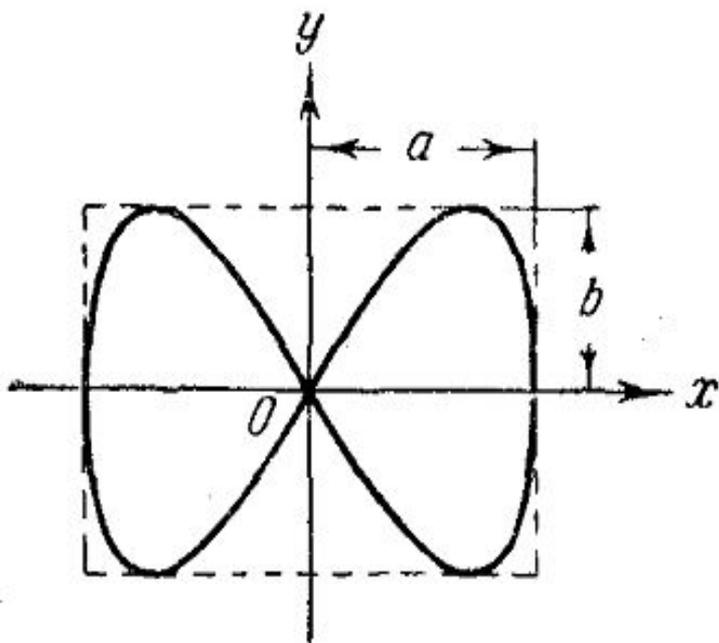


Рис. 179.

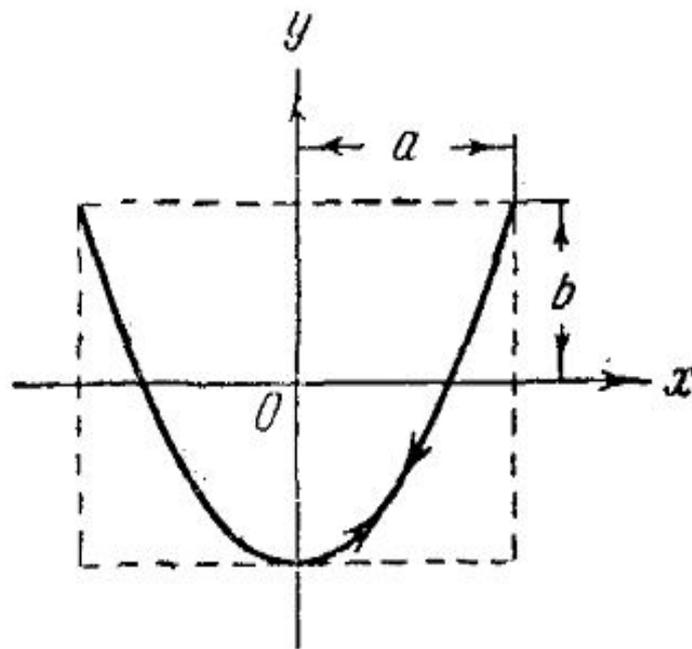


Рис. 180.

Сложение взаимно-перпендикулярных колебаний (4)

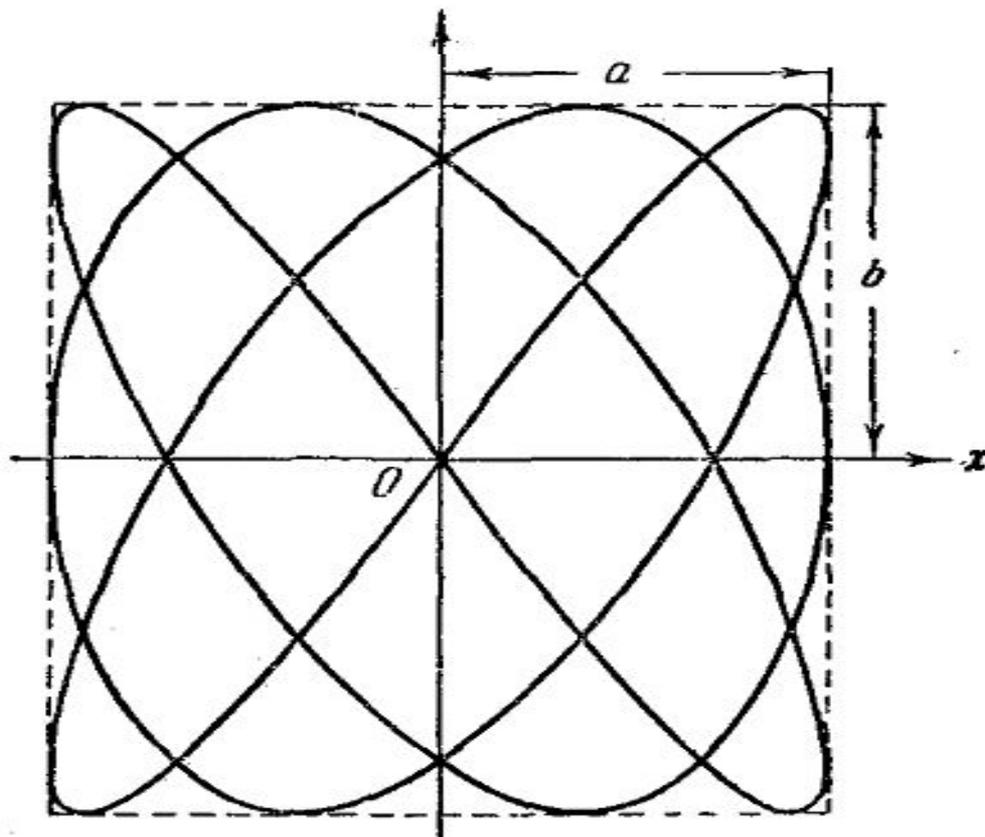


Рис. 181.

Фазовая диаграмма

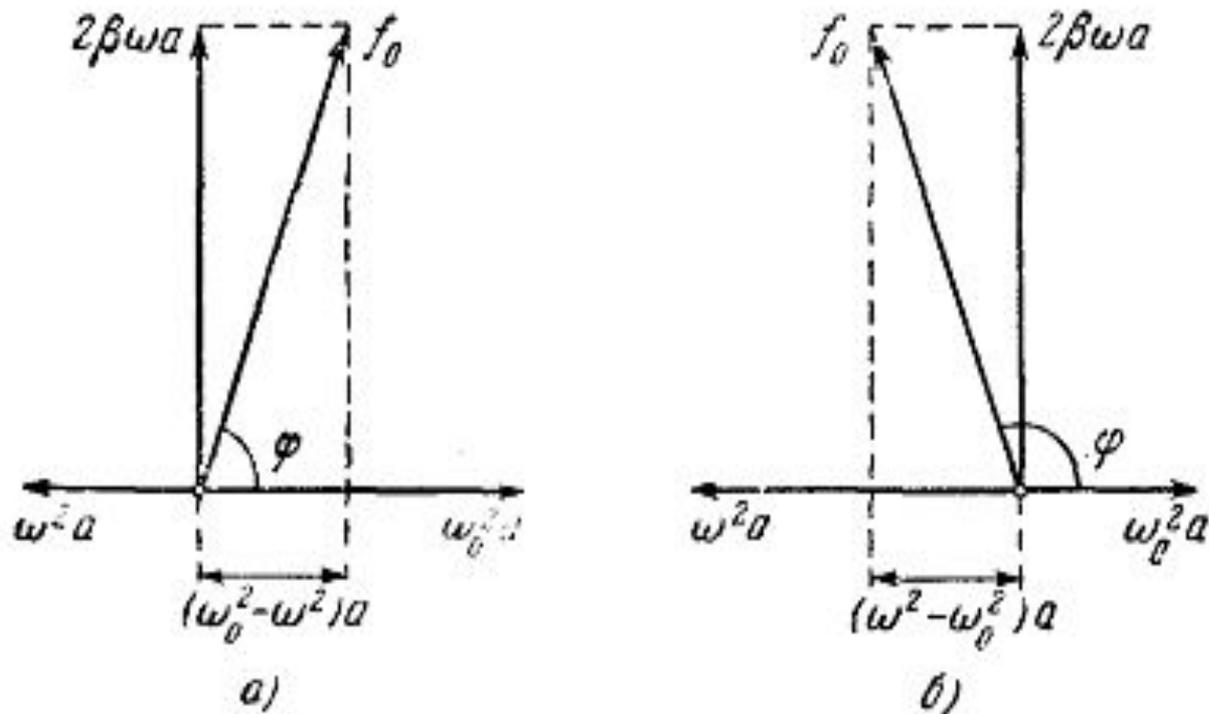
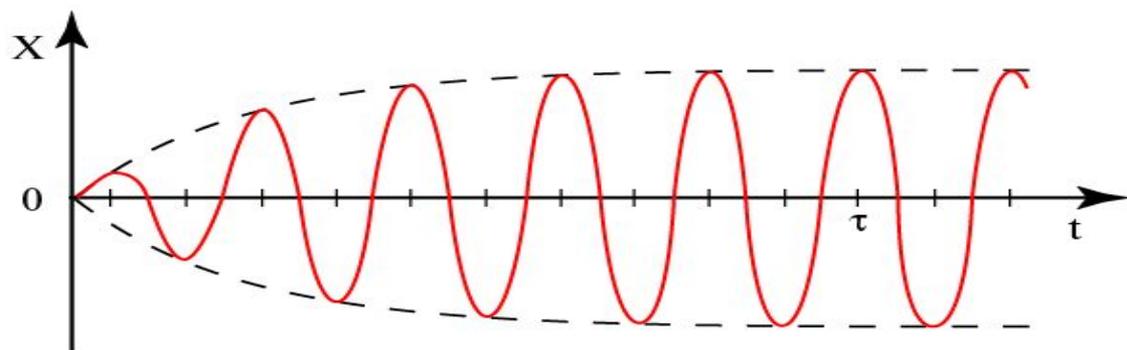
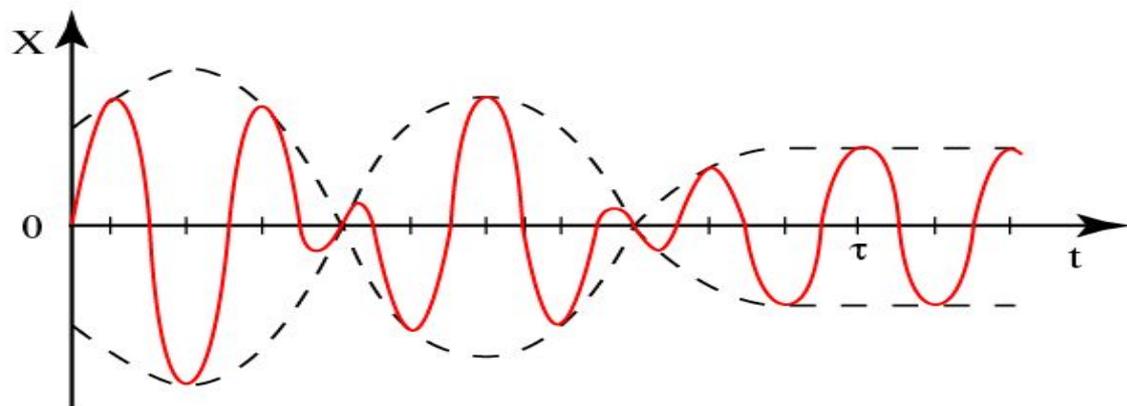
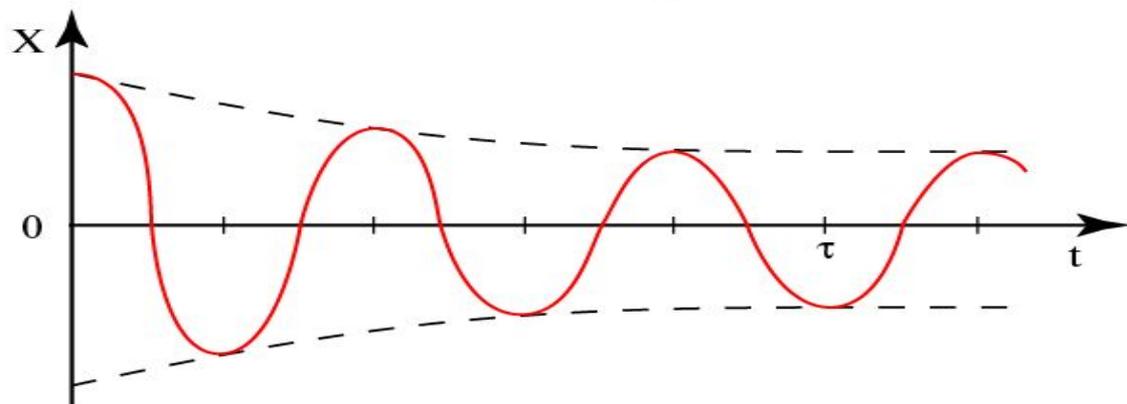


Рис. 187.

Виды установления вынужденных колебаний



$$(\tau > \beta^{-1})$$

Установление вынужденных колебаний (2)

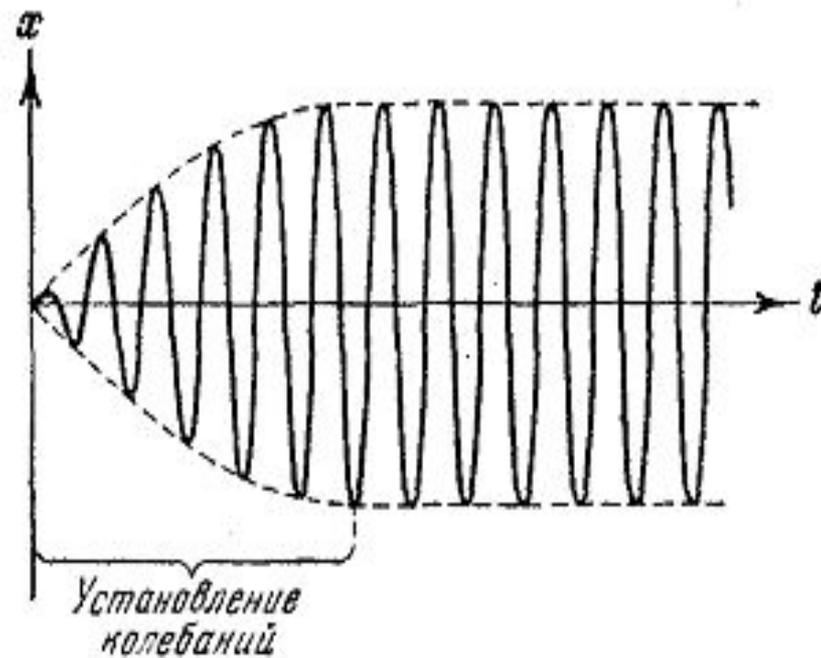
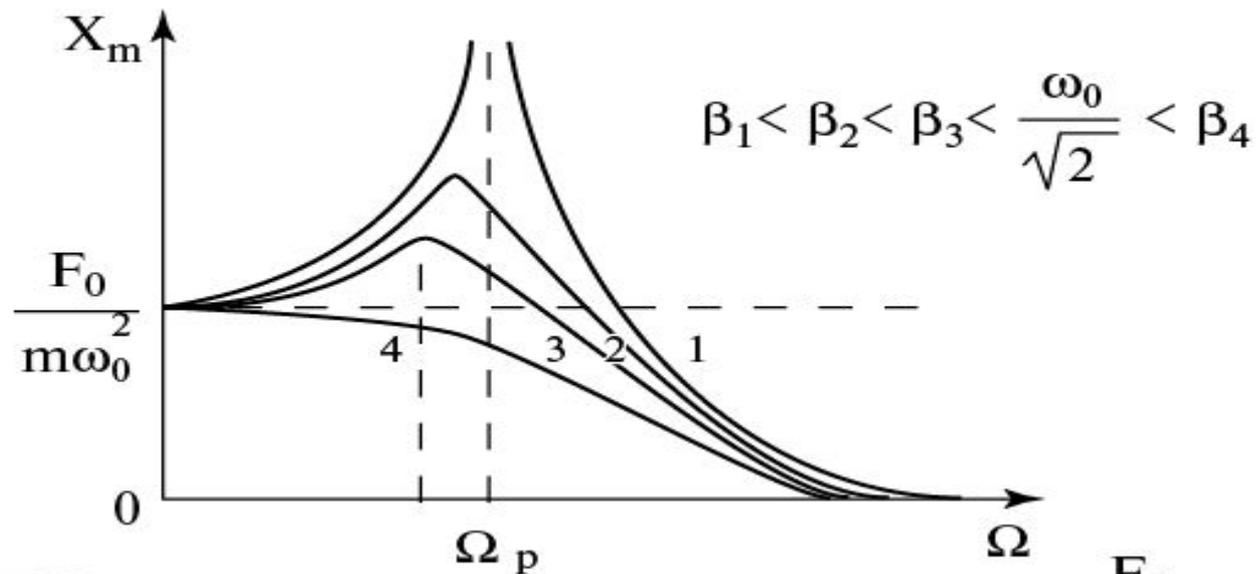


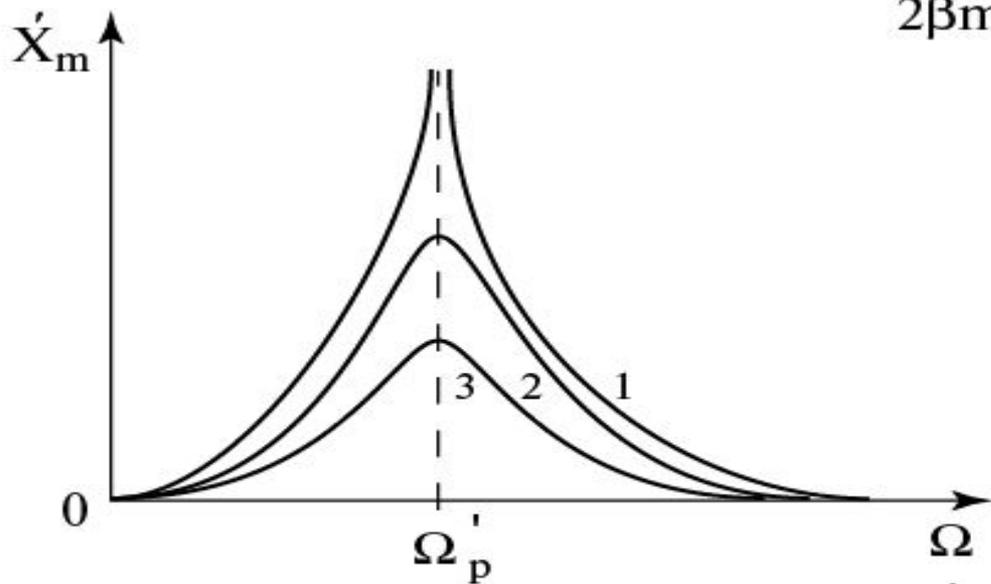
Рис. 188.

Резонансные кривые (АЧХ)



$$\Omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$$

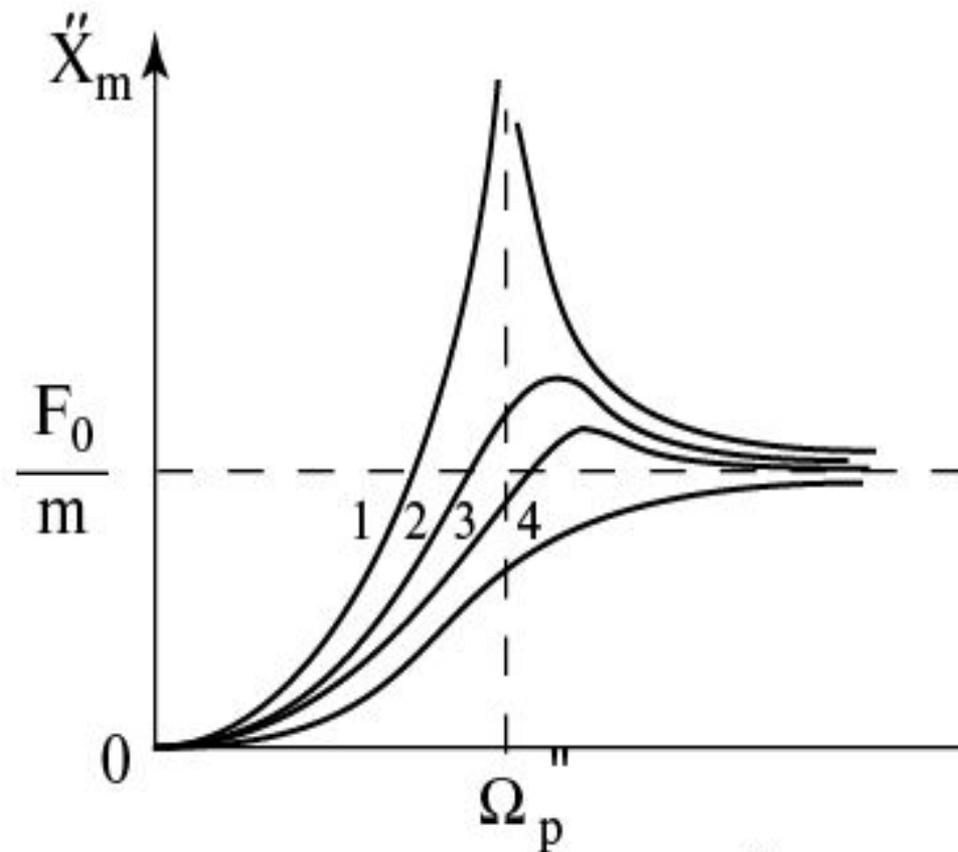
$$(X_m)_{\max} = \frac{F_0}{2\beta m \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$$



$$\Omega'_p = \omega_0$$

$$(\dot{X}_m)_{\max} = \frac{F_0}{2\beta m}$$

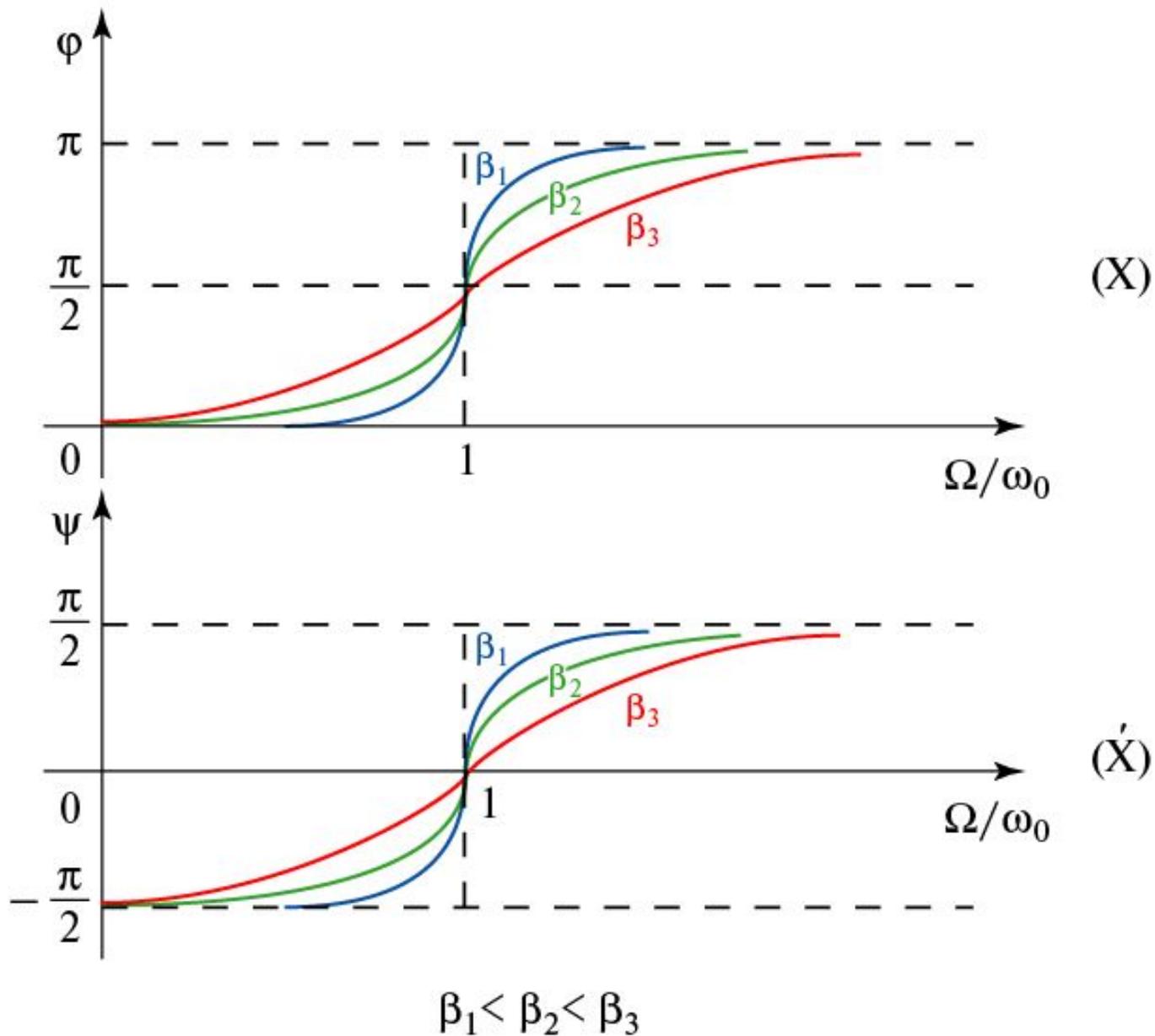
Резонансные кривые (АЧХ)



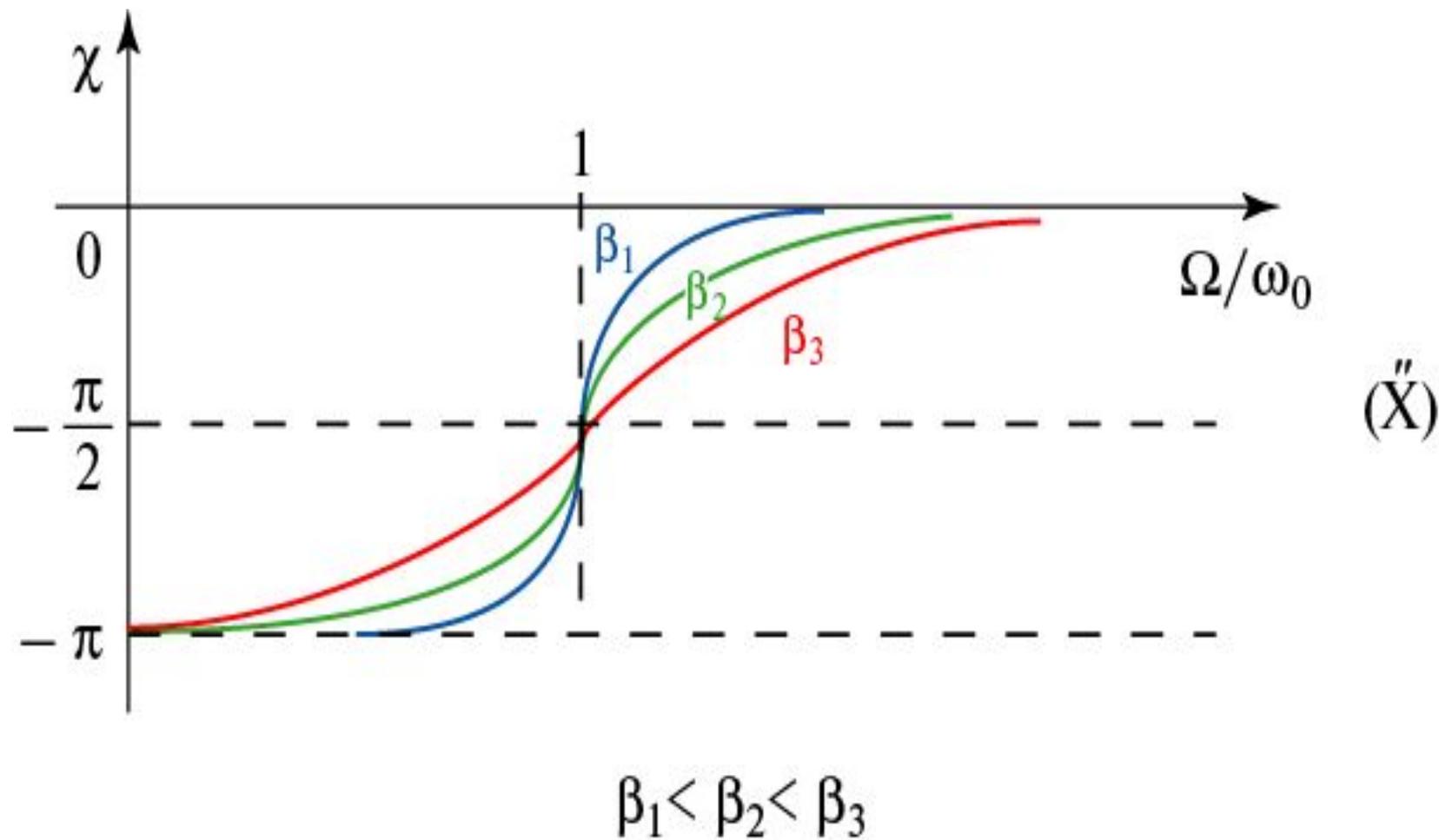
$$\Omega_p = \frac{\omega_0}{\sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}}$$

$$(\ddot{X}_m)_{\max} = \frac{F_0 \omega_0^2}{2\beta m \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$$

Фазочастотные характеристики (ФЧХ)



Фазочастотные характеристики (ФЧХ)



Автоколебания (1)

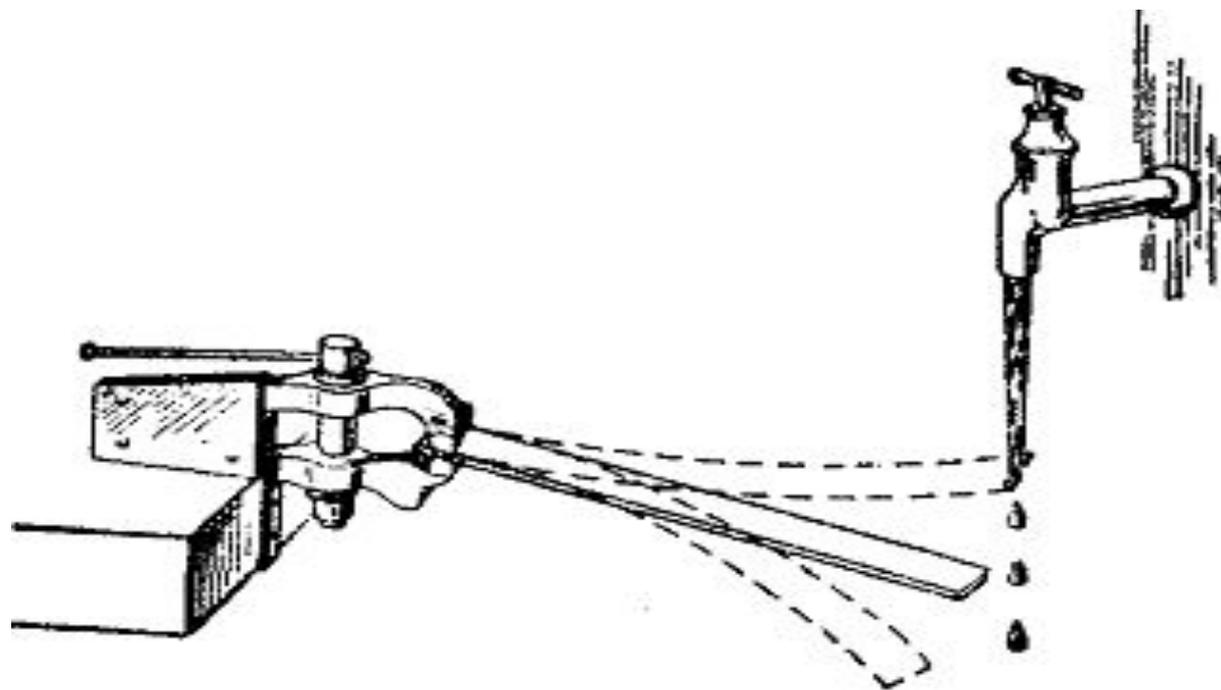


Рис. 185.

Автоколебания (2)

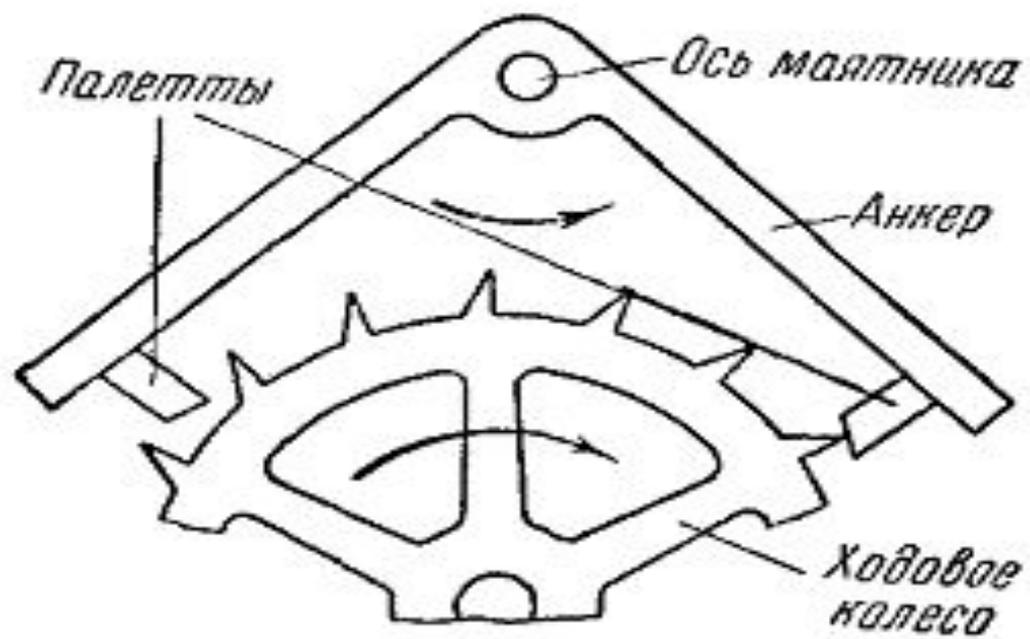


Рис. 186.

Параметрические колебания

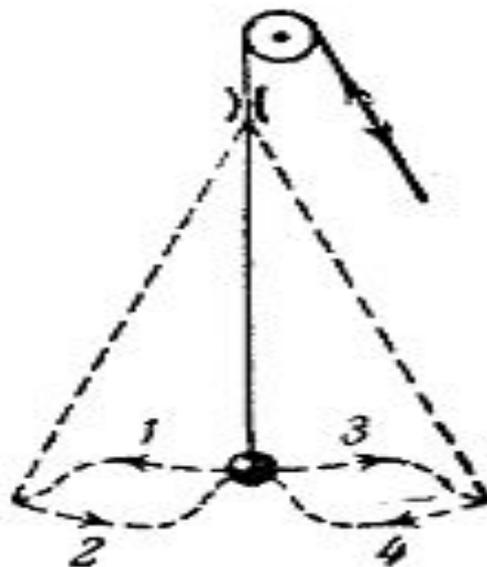
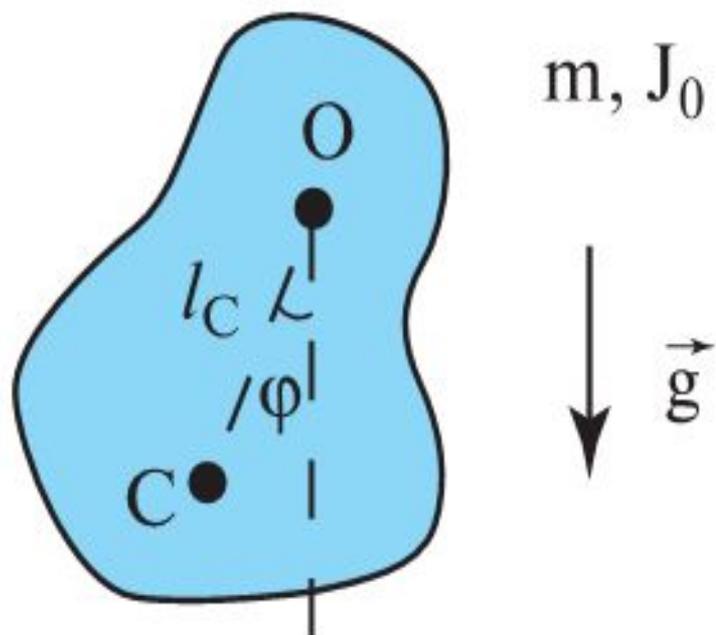
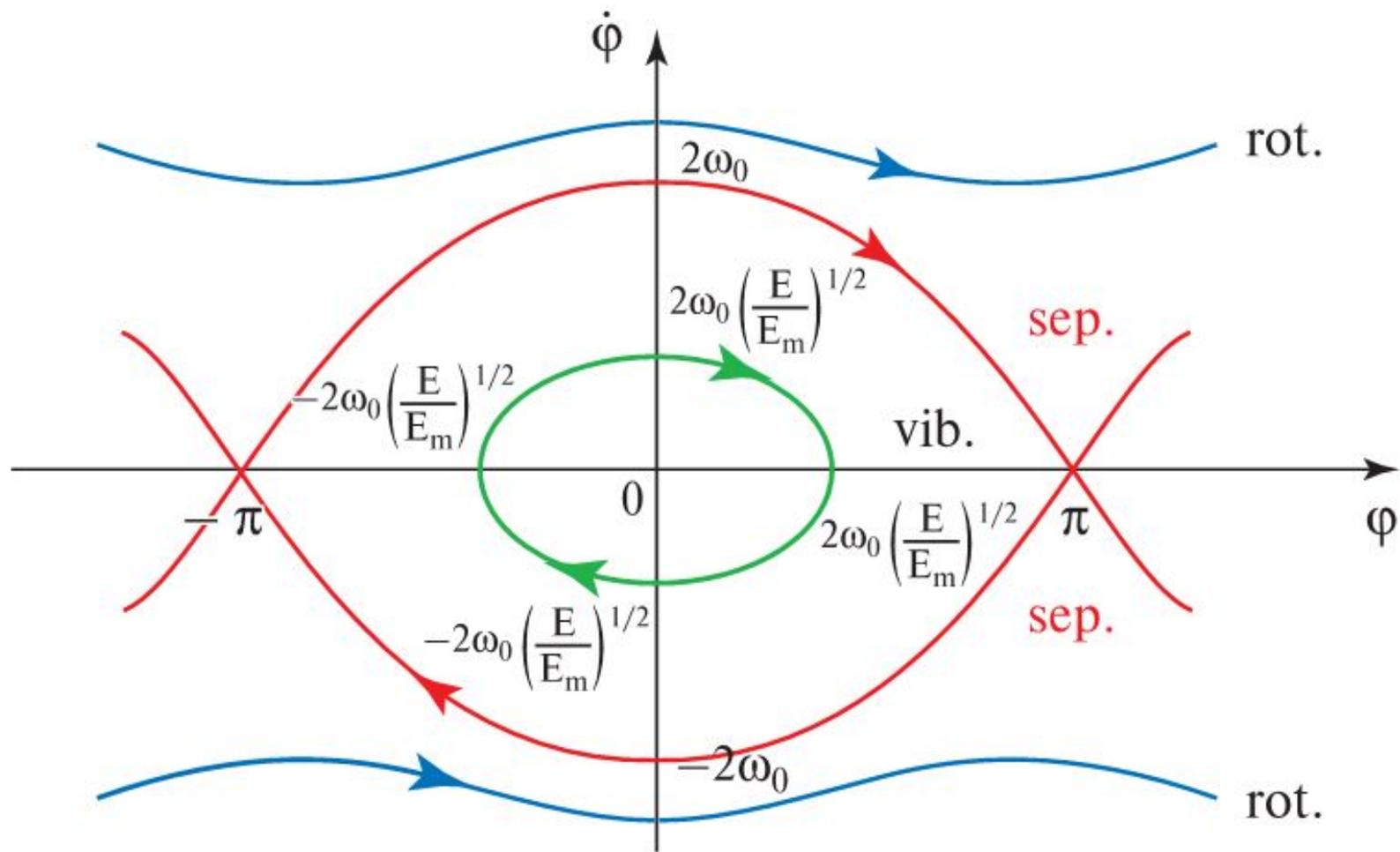


Рис. 191.

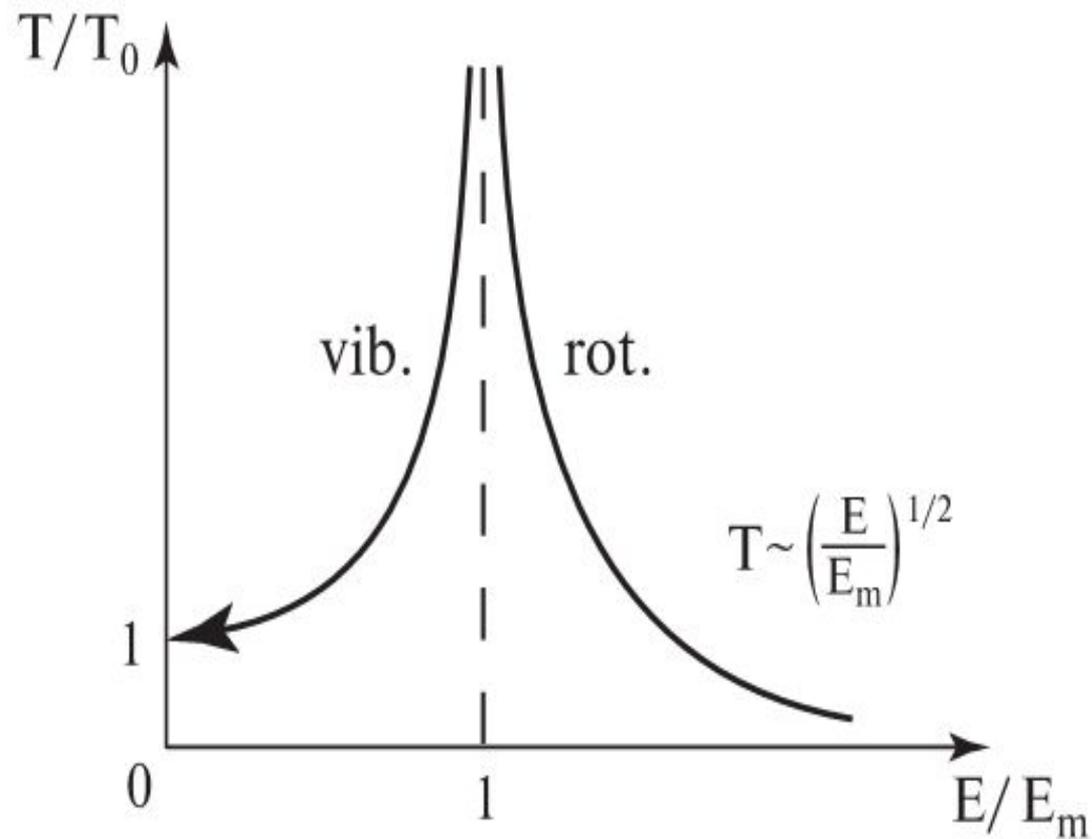
Нелинейные колебания физического маятника.



Маятник.

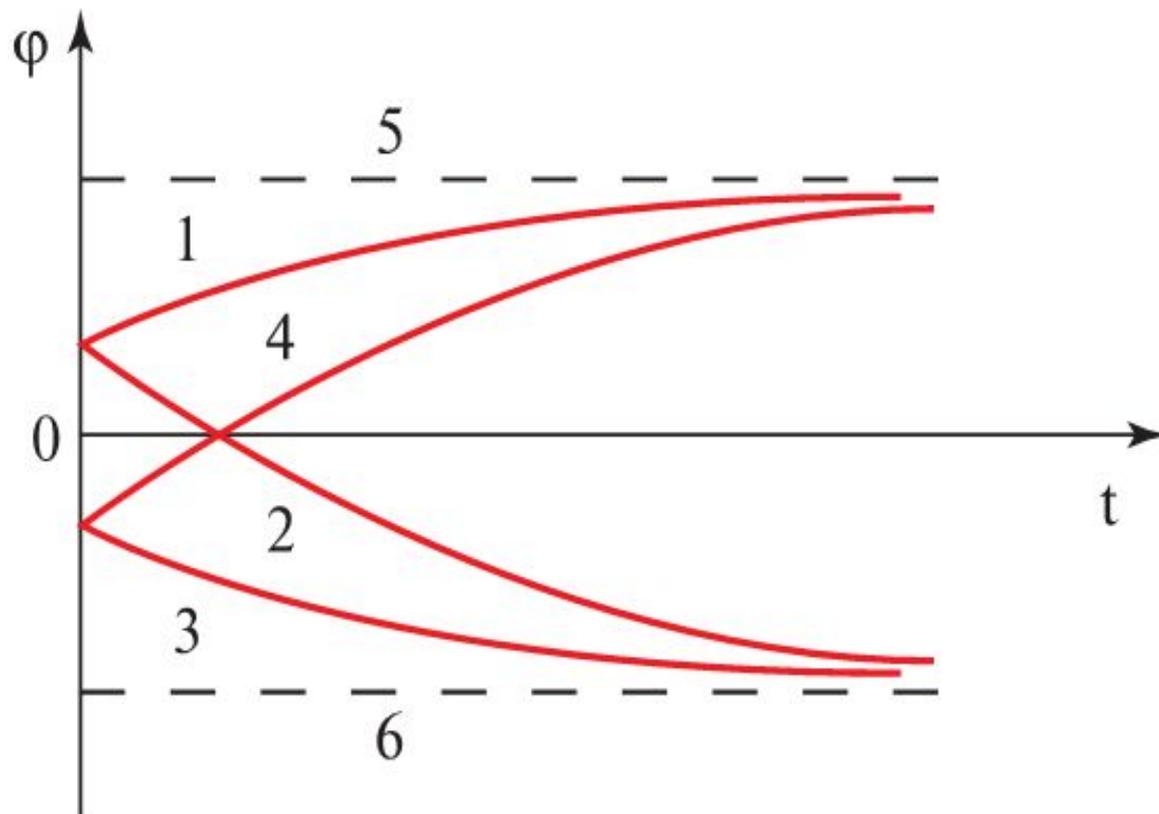


Фазовые портреты движения.

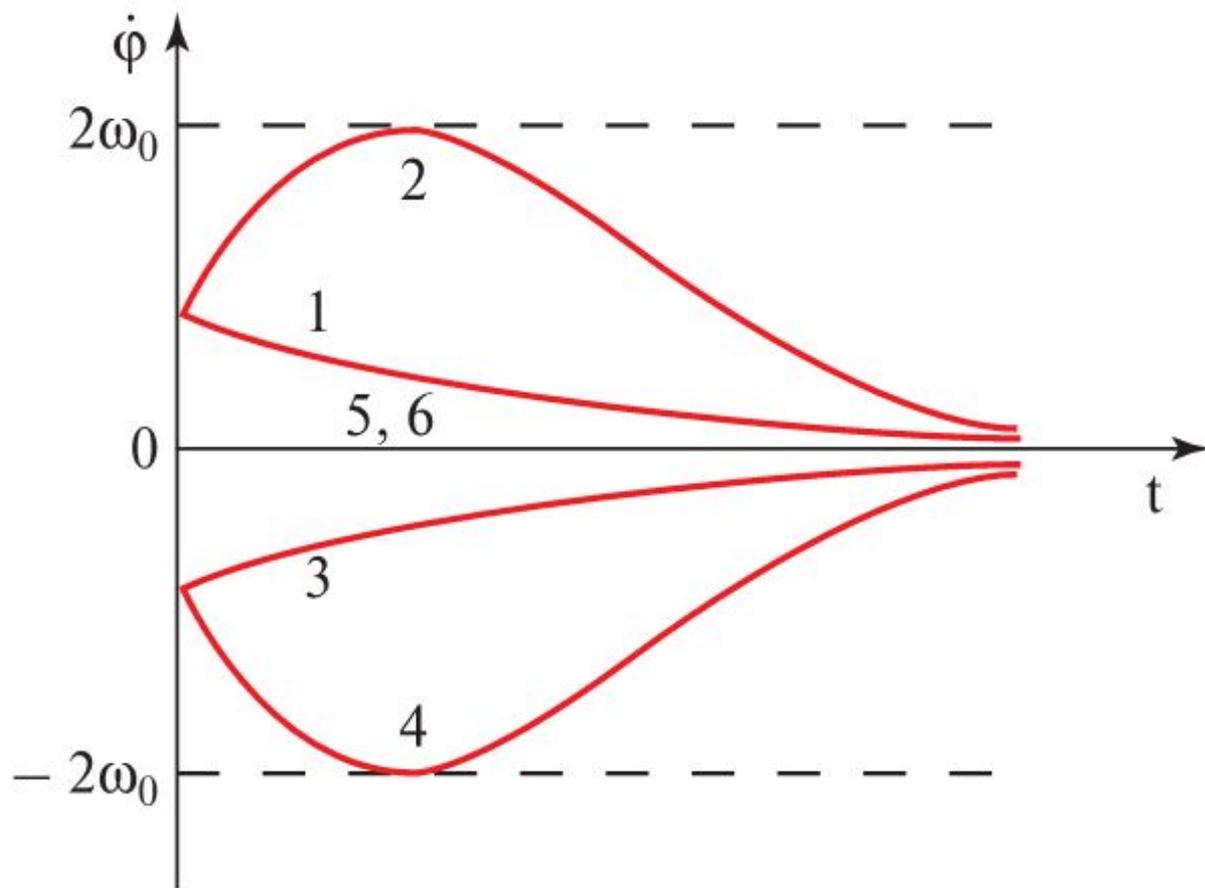


Зависимость периода движения
физического маятника от его полной энергии.

Движение маятника вблизи
критического значения энергии E_m .

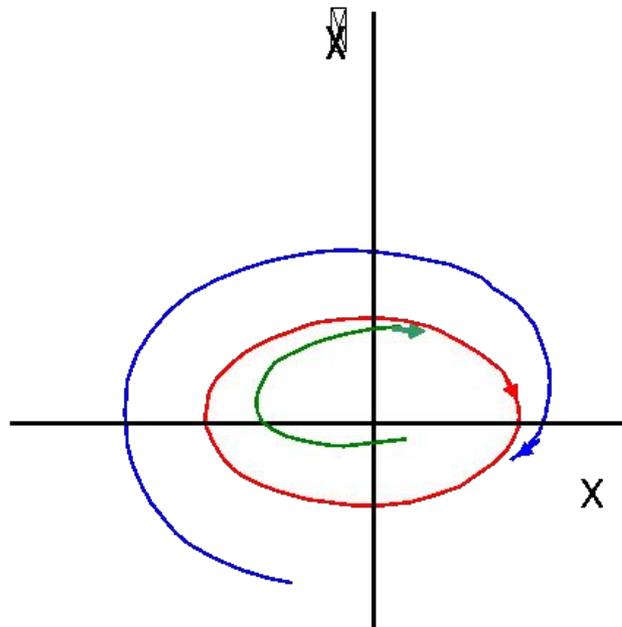


а) Зависимость от времени угла отклонения маятника.

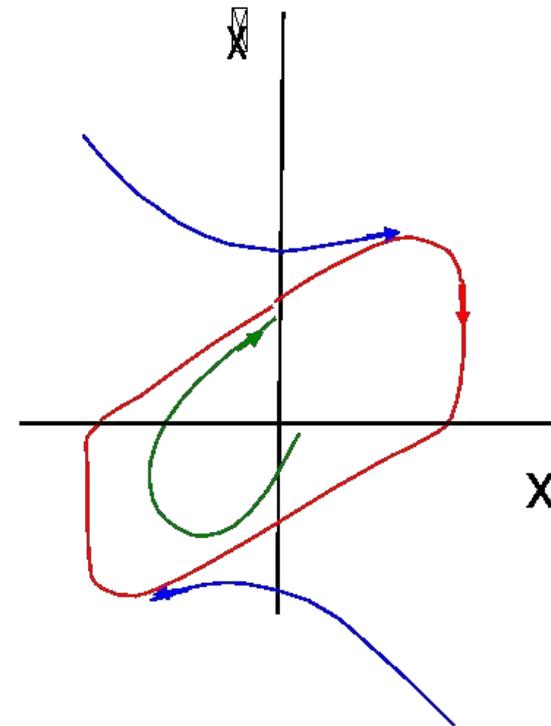


б) Зависимость от времени угловой скорости маятника.

Пределные циклы



Квазигармонические
колебания



Негармонические
колебания

Лекция 4

1. Атомно-молекулярное строение вещества.
2. Макроскопическая система. Подсистема. Динамический подход к описанию макроскопической системы.
3. Макроскопические параметры (**N, V, P, U**). Микросостояния.
4. Хаотичность движения молекул и флуктуации макроскопических параметров подсистемы.
5. Релаксация неравновесных состояний замкнутой системы.
6. Демонстрации: Int2, Demo-NGU, Brawn.

Таблица 1.1.

Частица, атом	Масса, а.е.м.	Масса, кг
Электрон, e	$5,485\ 799\ 03 \cdot 10^{-4}$	$9,109\ 3897 \cdot 10^{-31}$
Мюон, μ	0,113 428 913	$1,883\ 5327 \cdot 10^{-28}$
Протон, p	1,007 276 470	$1,672\ 6231 \cdot 10^{-27}$
Нейтрон, n	1,008 664 904	$1,674\ 9286 \cdot 10^{-27}$
Дейтон, d (ядро дейтерия)	2,013 553 214	$3,343\ 5860 \cdot 10^{-27}$
Атом H^1	1,007 825 04	Вычислите сами, если Вам это интересно. Обратите внимание на то, что протон, грубо говоря в 2000 раз тяжелее электрона (точнее в 1837 раз).
Атом He^4	4,002 603	
Атом N^{14}	14,003 074 0	
Атом O^{16}	15,994 915	
Атом U^{235}	235,043 93	
Атом Md^{256} , Менделевий	258,098 6	

Таблица 1.2

Атом или молекула	Эффективный диаметр, Å	Атом или молекула	Эффективный диаметр, Å
H ₂	2,5 – 2,77	CO ₂	3,24 – 4,54
H ₂ O	3,50	NH ₃	3,0
N ₂	3,5	CH ₄	3,24 – 4,30
O ₂	2,94 – 3,56	Cl ₂	3,55 – 5,86
CO	3,17 – 3,79	NO	3,4

Таблица 1.3.

Молекула	CO ₂	H ₂ O	C ₃ H ₈
Степеней. св. всего	9	9	33

поступательных	3	3	3
вращательных	2	3	3
колебательных	4	3	27

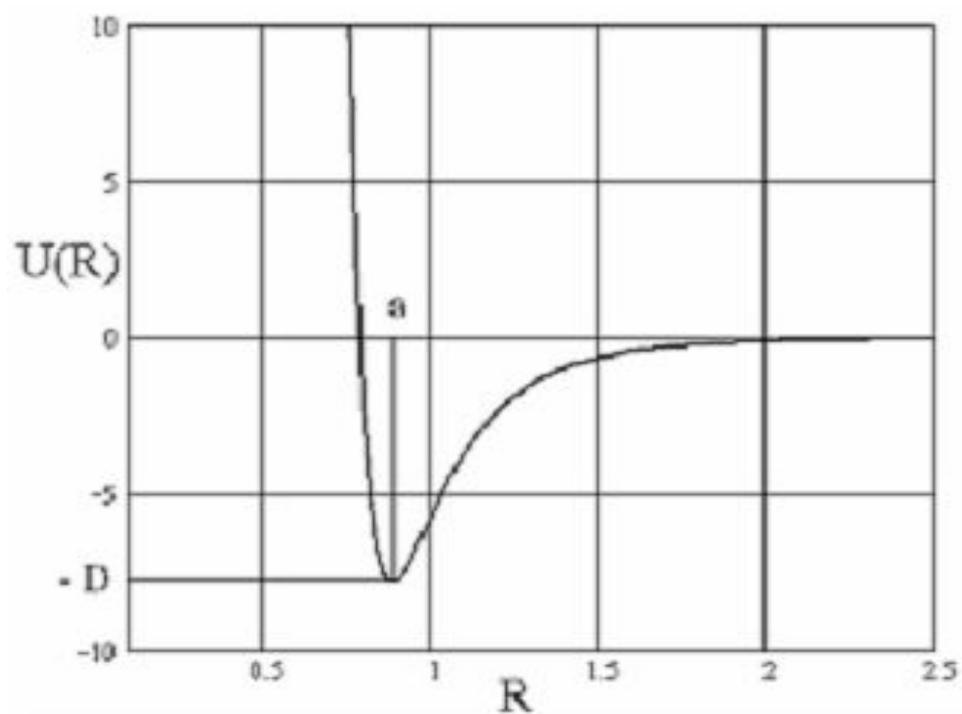


Рис. 1.3. Характерный вид кривой потенциальной энергии взаимодействия атомов в молекуле: D - глубина потенциальной ямы, a - равновесное расстояние между ядрами.

Таблица 1.4.

Взаимодействующие молекулы	$\varepsilon_m, 10^{-3}$ эВ	$R_m, \text{Å}$
$H_2 - H_2$	3,0	3,4
$N_2 - N_2$	3,5	3,7
$O_2 - O_2$	3,8	3,5
$Ne - Xe$	6,1	3,8
$Hg - Na$	55	4,7

Плотность вероятности распределения частицы по переменной x

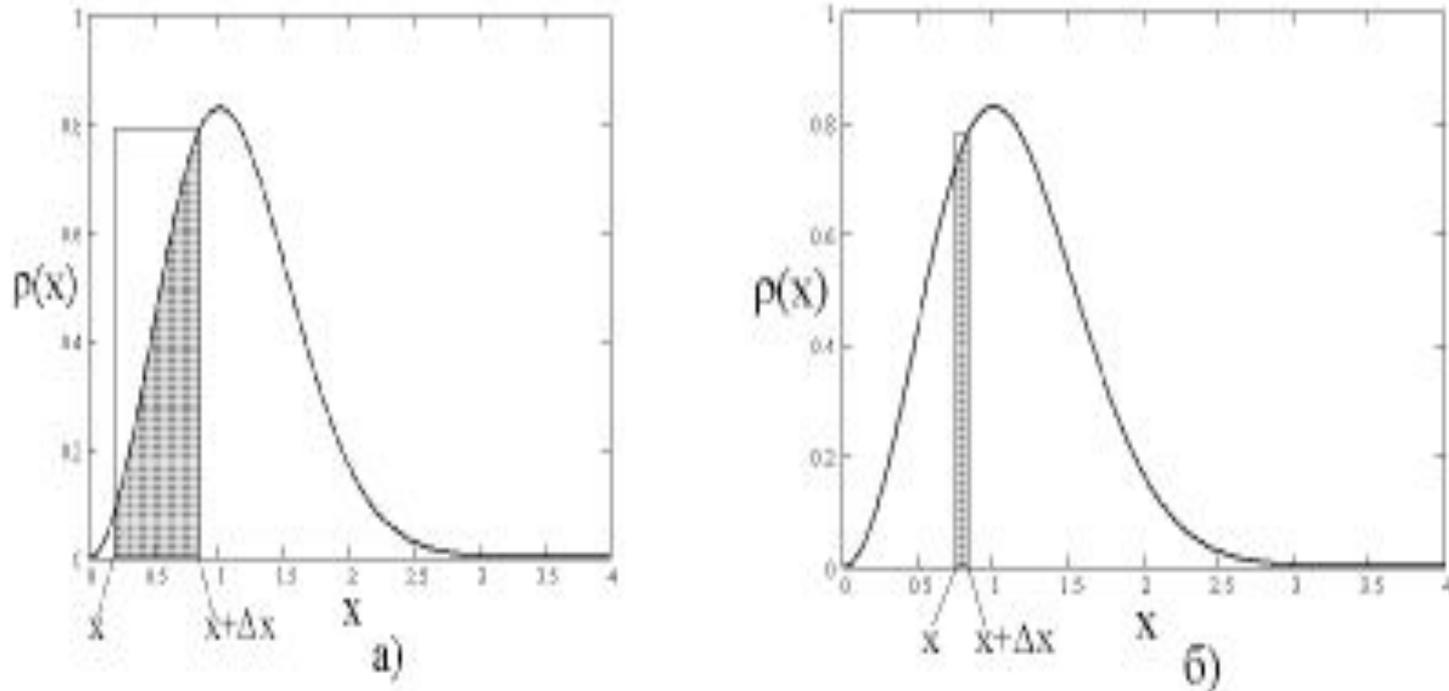


Рис. 2.3. На рис. 2.3а $\Delta x \sim \Delta x_{\text{эф}}$, на рис. 2.3б $\Delta x \ll \Delta x_{\text{эф}}$. Видно, что при выполнении неравенства (2.36) отличие указанных площадей невелико.

Первое начало термодинамики (1)

$$d'Q = dU + d'A ;$$

$$Q_{12} = U_{12} + A_{12} ;$$

$$U = C_V T ; \quad A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV ;$$

$$U_{12} = \Delta U = C_V (T_2 - T_1) . \quad pV^\alpha = p_1 V_1^\alpha$$

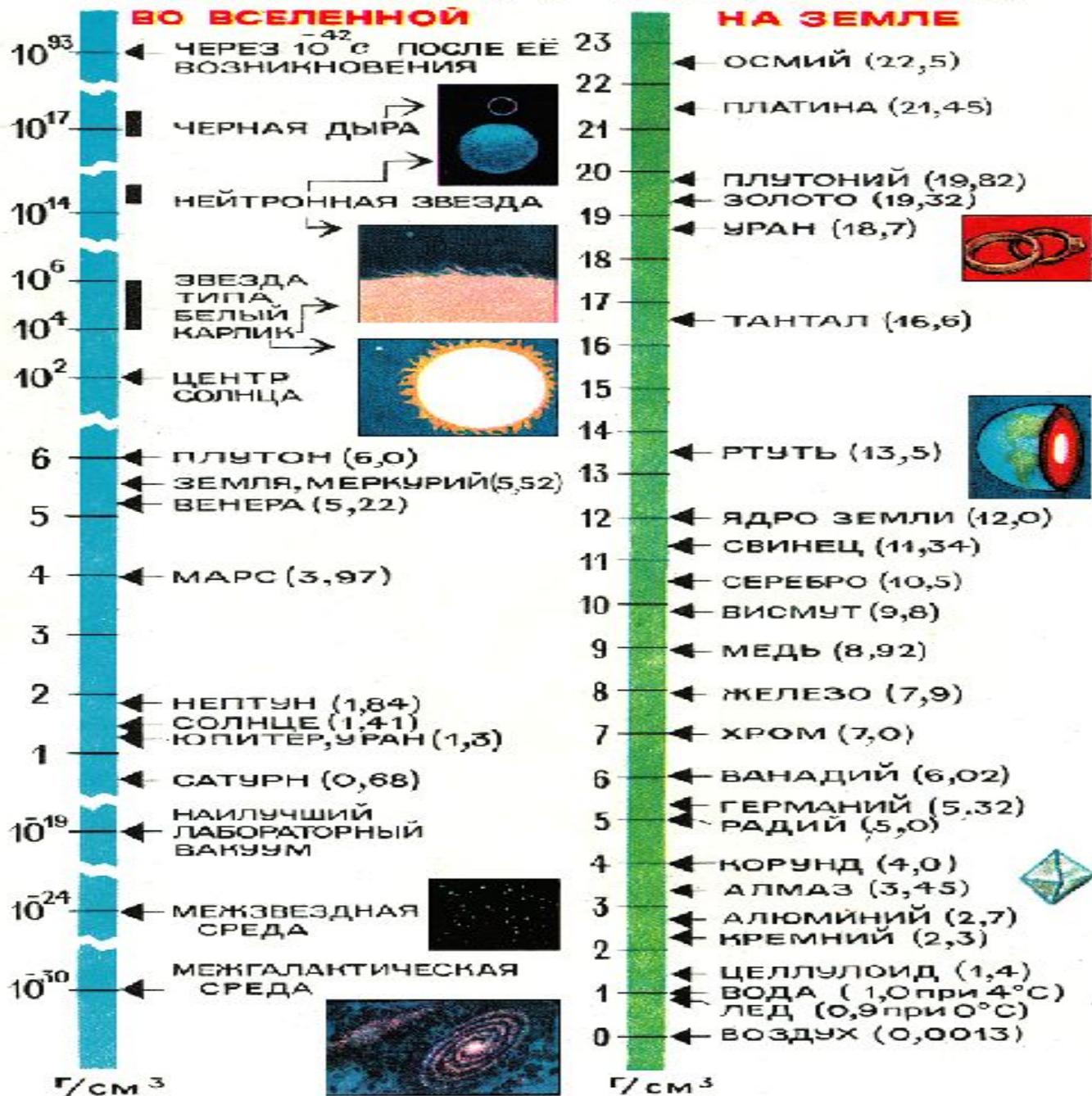
$$\begin{aligned} \Delta'A = A_{12} &= p_1 V_1^\alpha \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^\alpha} = p_1 V_1^\alpha \left(\frac{V^{1-\alpha}}{1-\alpha} \right) \Big|_{V_1}^{V_2} = \\ &= \frac{p_1 V_1^\alpha}{1-\alpha} \left(\frac{1}{V_2^{\alpha-1}} - \frac{1}{V_1^{\alpha-1}} \right) = \frac{p_1 V_1}{1-\alpha} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\alpha-1} \right) \end{aligned}$$

a) $\alpha \neq 1$

b) $\alpha = 1 \longrightarrow A_{12} = \lim_{\alpha \rightarrow 1} p_1 V_1 \left(\frac{1-x^{1-\alpha}}{1-\alpha} \right) =$

$$= - p_1 V_1 \frac{x^{\alpha-1} \ln x}{1} \Big|_{\alpha=1} = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА



Лекция 5 (1)

1. Элементы теории вероятностей.

Статистический ансамбль. Определение вероятности с помощью статистического ансамбля. Функции распределения.

2. Свойства вероятности. Условие нормировки. теоремы сложения и умножения. Вычисление средних значений величин и их свойства.

3. Статистическая физика и эмпирическая термодинамика. Термодинамические величины как средние значения микроскопических параметров. Макроскопическое состояние.

Лекция 5 (2)

4. Равновесное и неравновесное состояния термодинамических систем. Релаксация. Квазистатический процесс.
5. Вычисление термодинамических величин с помощью функции распределения (число ударов молекул о стенку сосуда, давление и внутренняя энергия идеального газа).
6. Демонстрации: Int2, Demo-NGU, STPHYS, TVER.

К теории вероятности (1)

Приведем результаты экспериментов по бросанию монеты, проведенных Бюффоном и Пирсоном³.

Экспериментатор	Число бросаний	Число выпадений герба	Частота
Бюффон	4040	2048	0,5080
К. Пирсон	12000	6019	0,5016
К. Пирсон	24000	12012	0,5005

К теории вероятности (2)

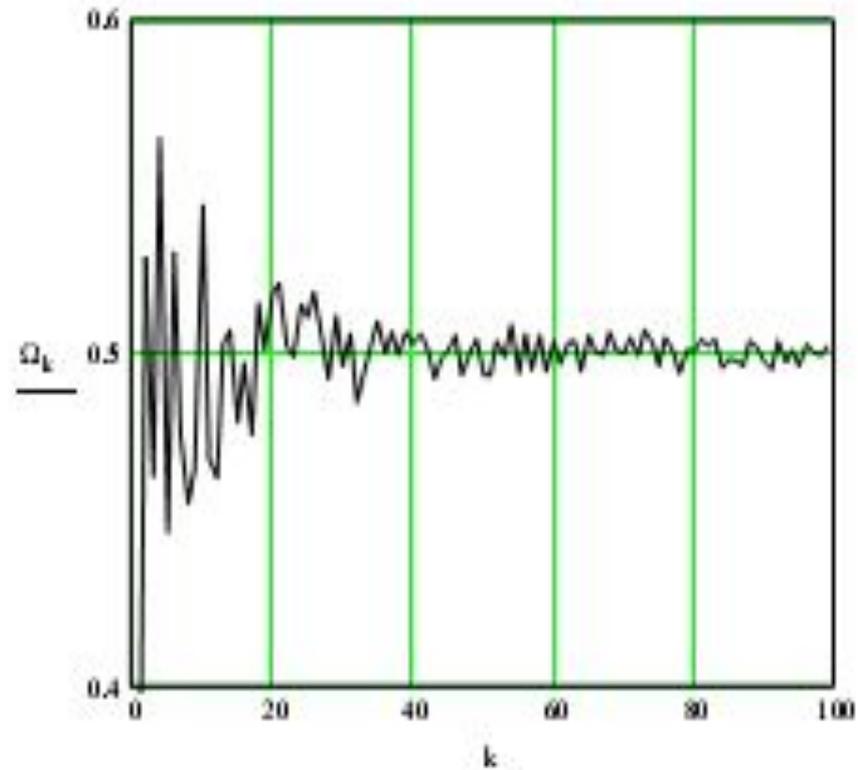
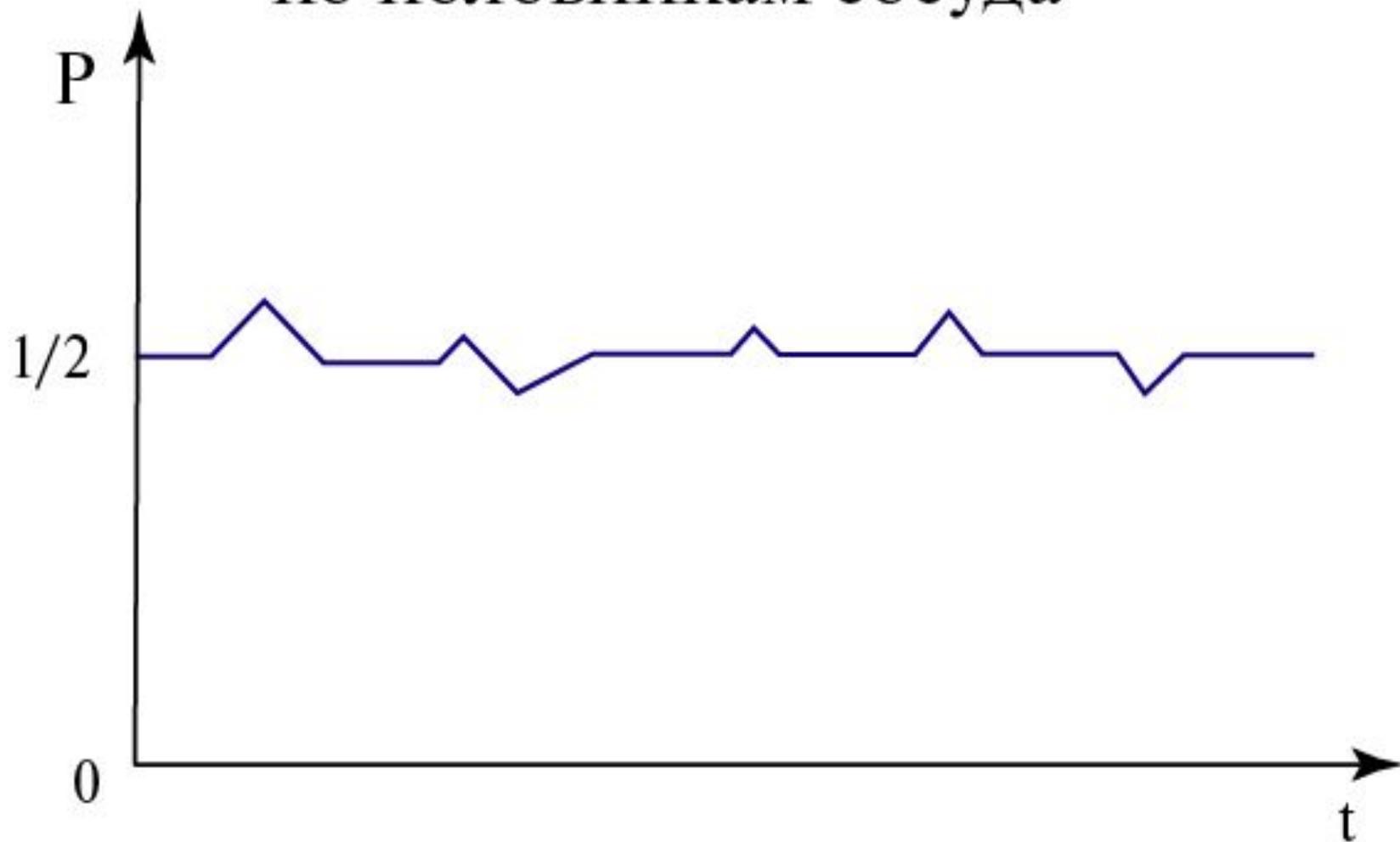
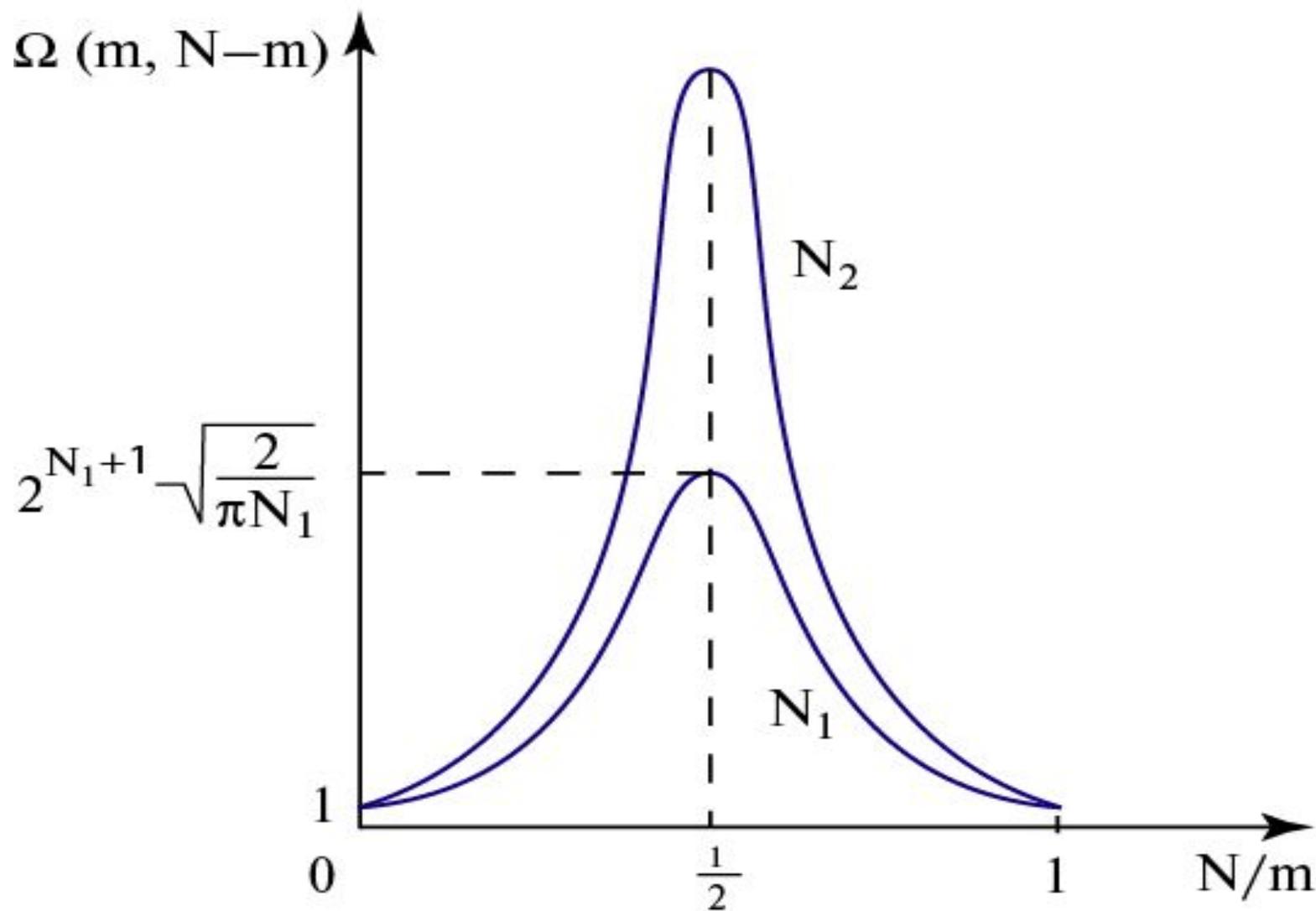


Рис. 2.1. Поведение частоты появления данного события (с вероятностью $\frac{1}{2}$) как функции числа испытаний.

Распределение частиц по половинкам сосуда



Зависимость числа состояний $\Omega(m, N-m)$



$$N_2 > N_1 \gg 1, \quad \Omega_{\max} = \tau\left(\frac{N}{2}, \frac{N}{2}\right) \approx 2^{N+1} \sqrt{\frac{2}{\pi N}}.$$

К теории вероятности (3)

35

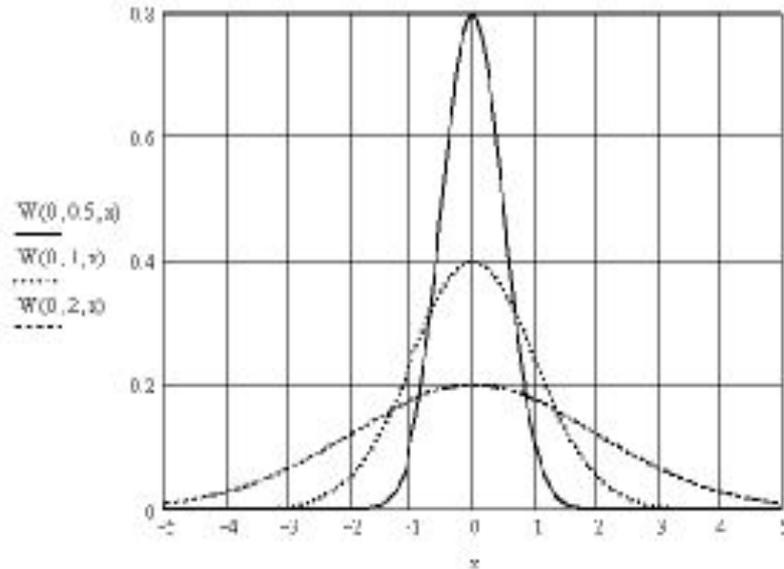
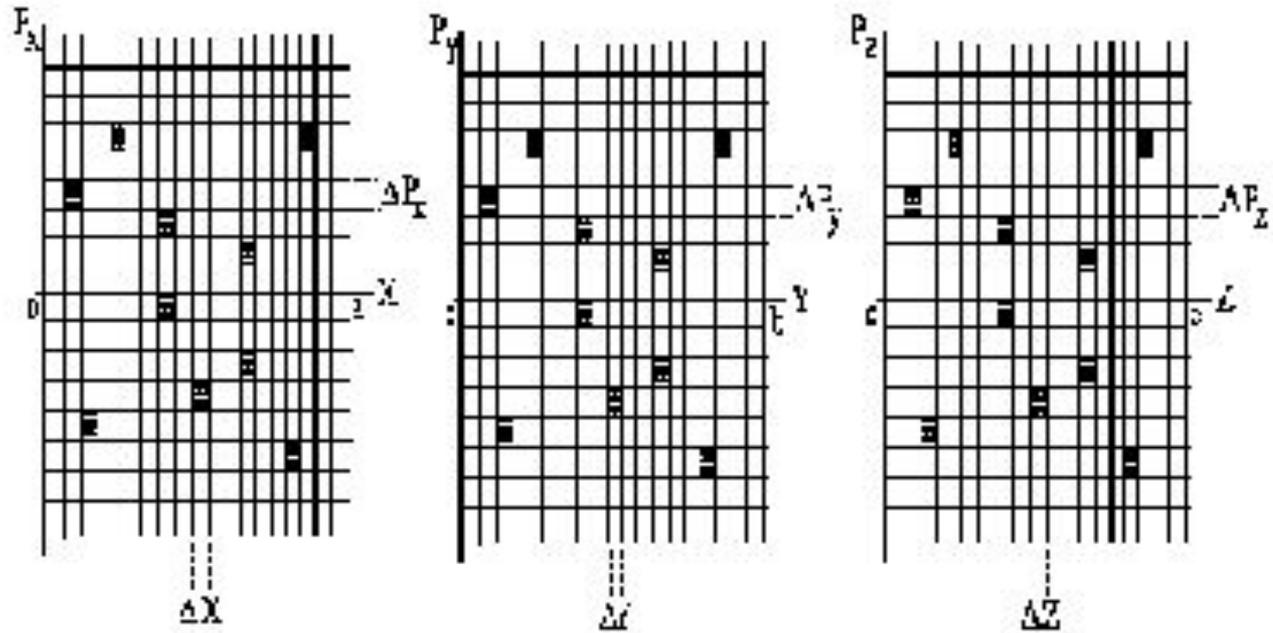


Рис. 2.5. Распределение Гаусса для различных значений среднеквадратичного отклонения.

К теории вероятностей (4)



Плотность вероятности распределения по переменной x

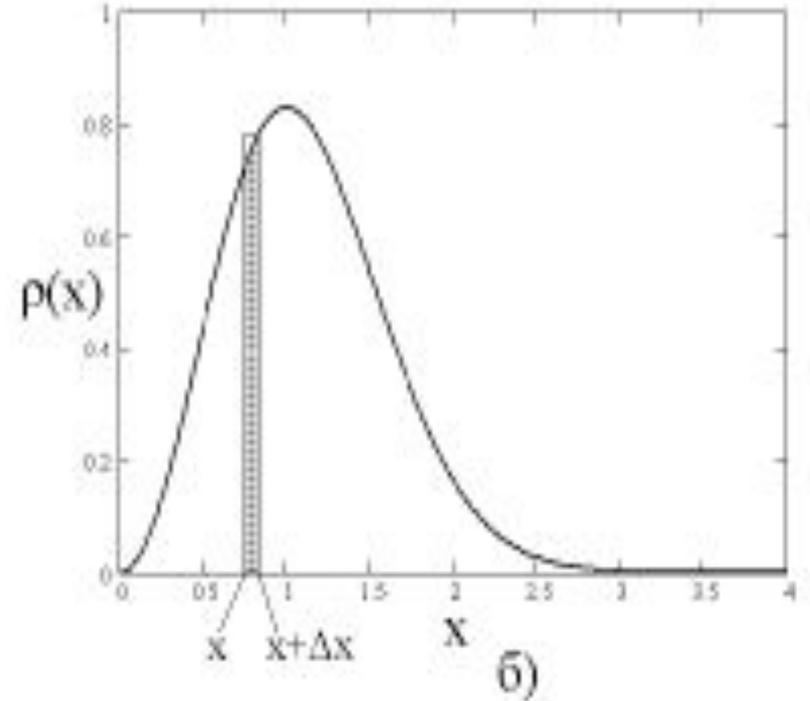
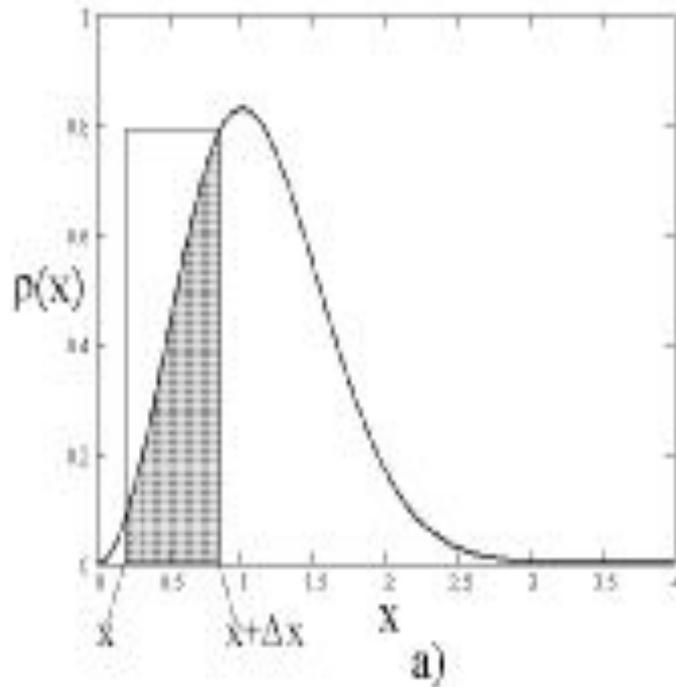


Рис. 2.3. На рис. 2.3а $\Delta x \sim \Delta x_{\text{эф}}$, на рис. 2.3б $\Delta x \ll \Delta x_{\text{эф}}$. Видно, что при выполнении неравенства (2.36) отличие указанных площадей невелико.

Соударения частиц со стенкой (1)

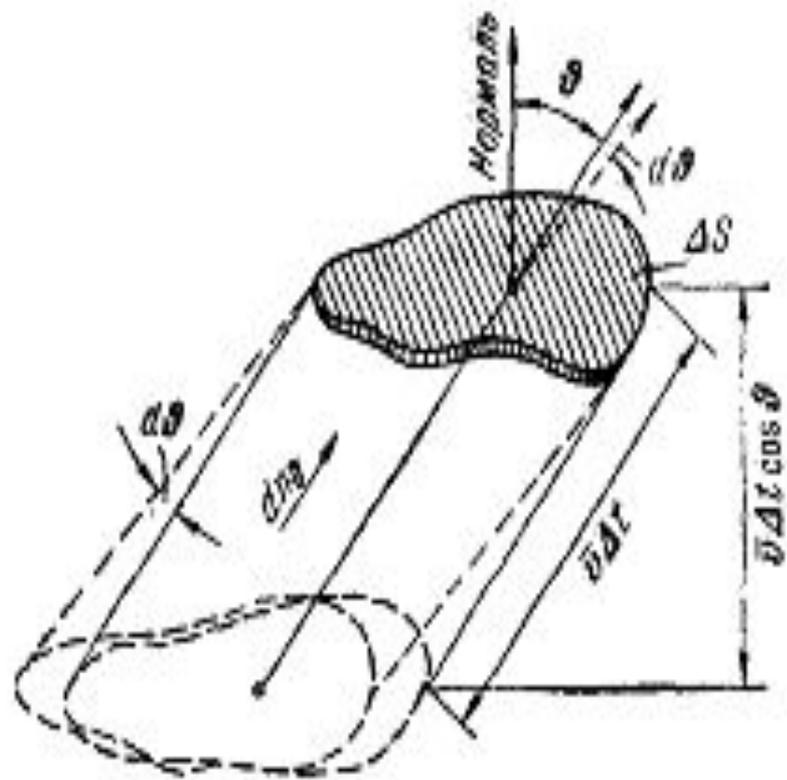


Рис. 226.

Соударения частиц со стенкой (2)

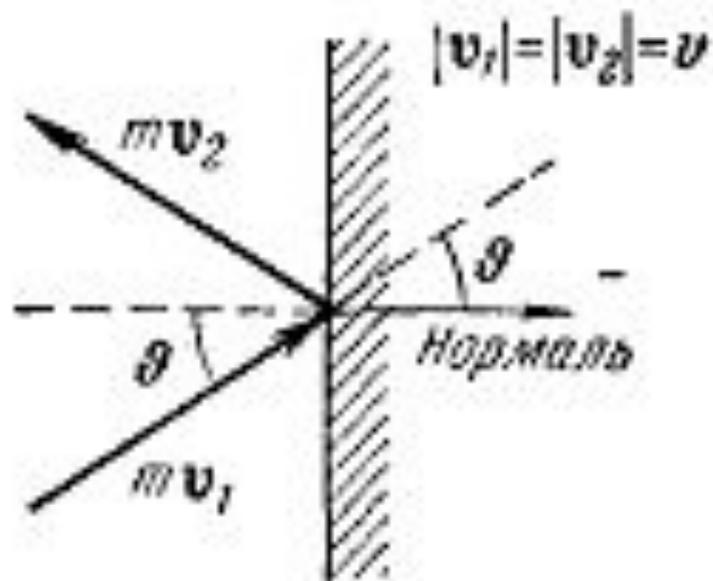
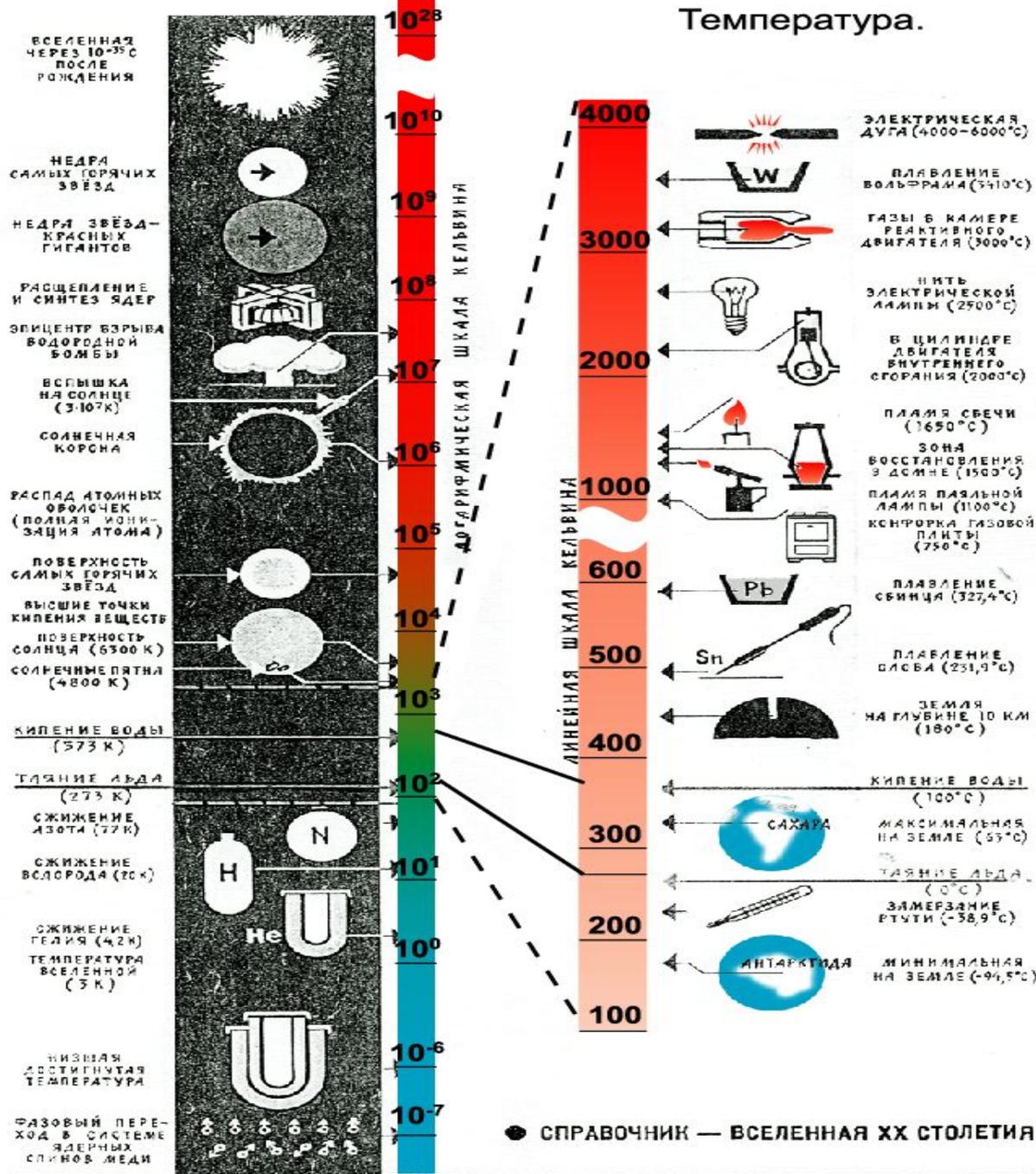


Рис. 227.

Лекция 6

1. Внутренняя энергия газа. работа. Количество теплоты. Первое начало термодинамики.
2. Уравнение состояния идеального газа. Замкнутая система. Постоянная Больцмана. Средняя энергия поступательного движения молекул. Температура и её физический смысл.
3. Энергия многоатомной молекулы в гармоническом приближении. Число степеней свободы. Классический закон равнораспределения энергии по степеням свободы в идеальном газе.
4. Адиабатический процесс. Политропические процессы. Теплоёмкость идеального газа в политропических процессах.
5. Демонстрации: Int2, Demo-NGU.



Графики изотермического и адиабатического процессов

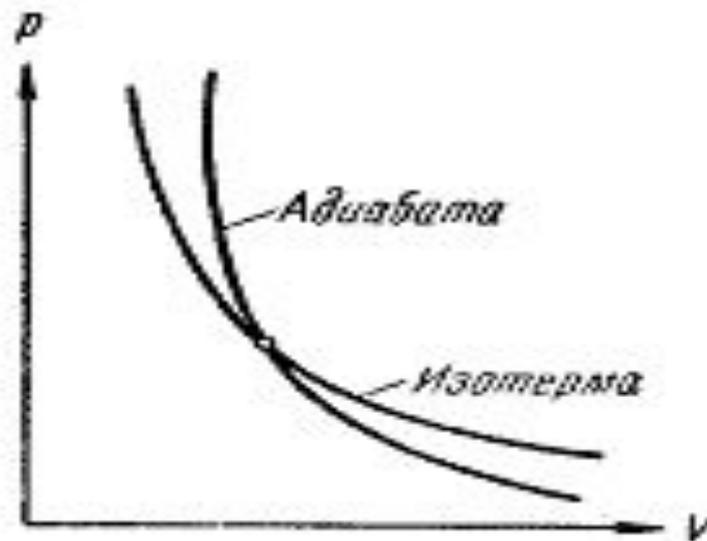
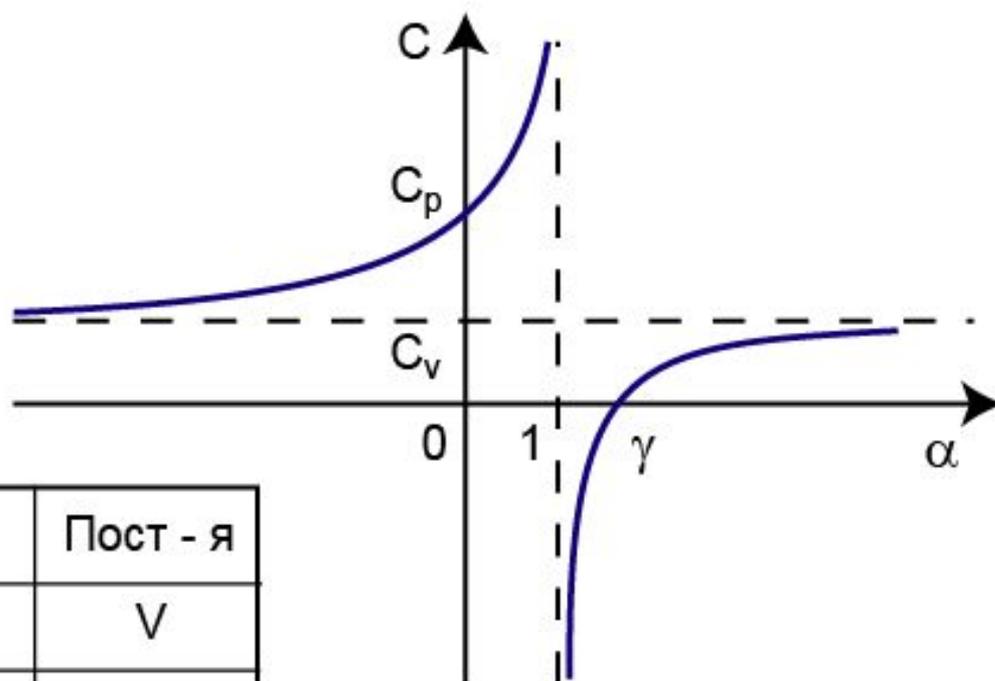


Рис. 235.

Зависимость теплоёмкости C идеального газа от постоянной политропы.

Политропические (изо-) процессы: $pV^\alpha = \text{const.}$



α	Назв - е	Пост - я
$\pm \infty$	изохор.	V
0	изобар.	P
1	изотерм.	T
γ	изоэнтроп.	C, S

$$dS = \frac{d'Q}{T} = 0; \quad C = \frac{d'Q}{dT} = 0;$$

$$\gamma = C_p/C_v = \frac{(i+2)}{i}; \quad C_v = \frac{i}{2} R; \quad C_p = C_v + R$$

Степени свободы твердого тела (1)

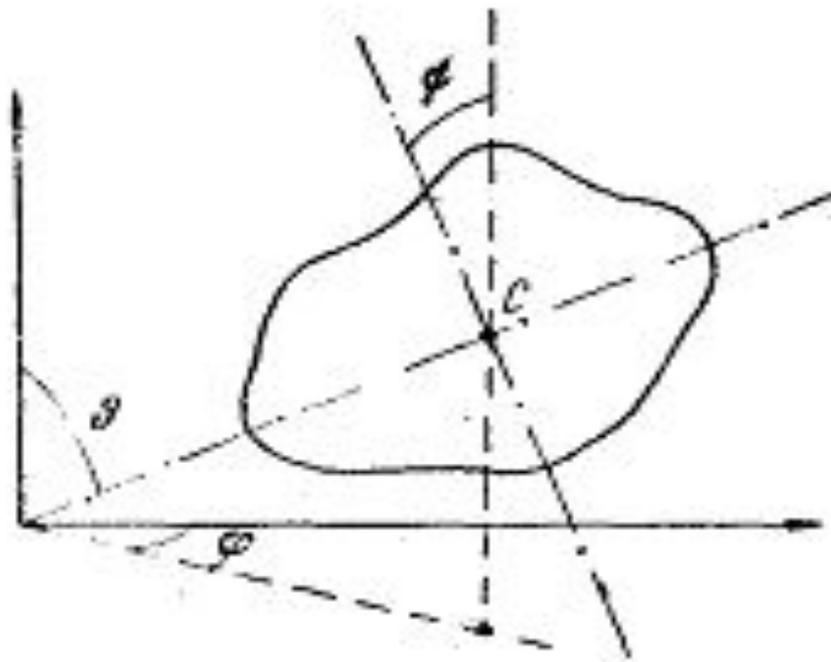


Рис. 228.

Степени свободы твердого тела (2)

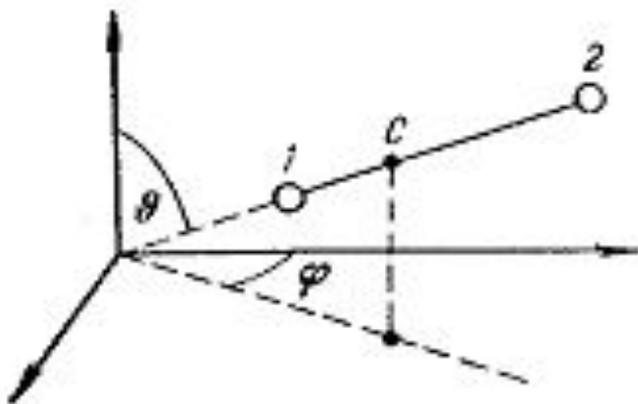


Рис. 230.

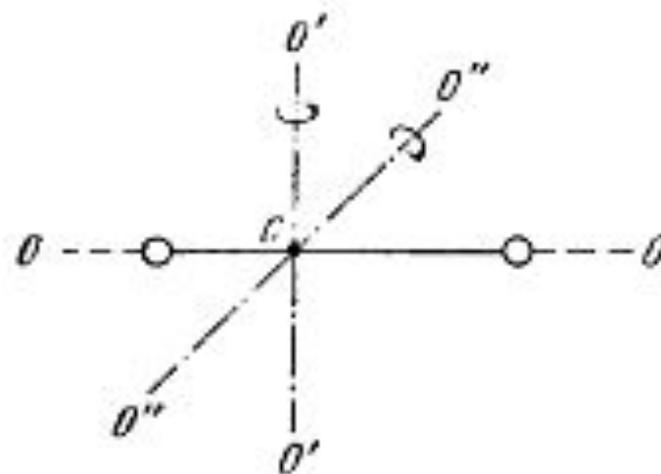


Рис. 231.

Степени свободы твердого тела (3)

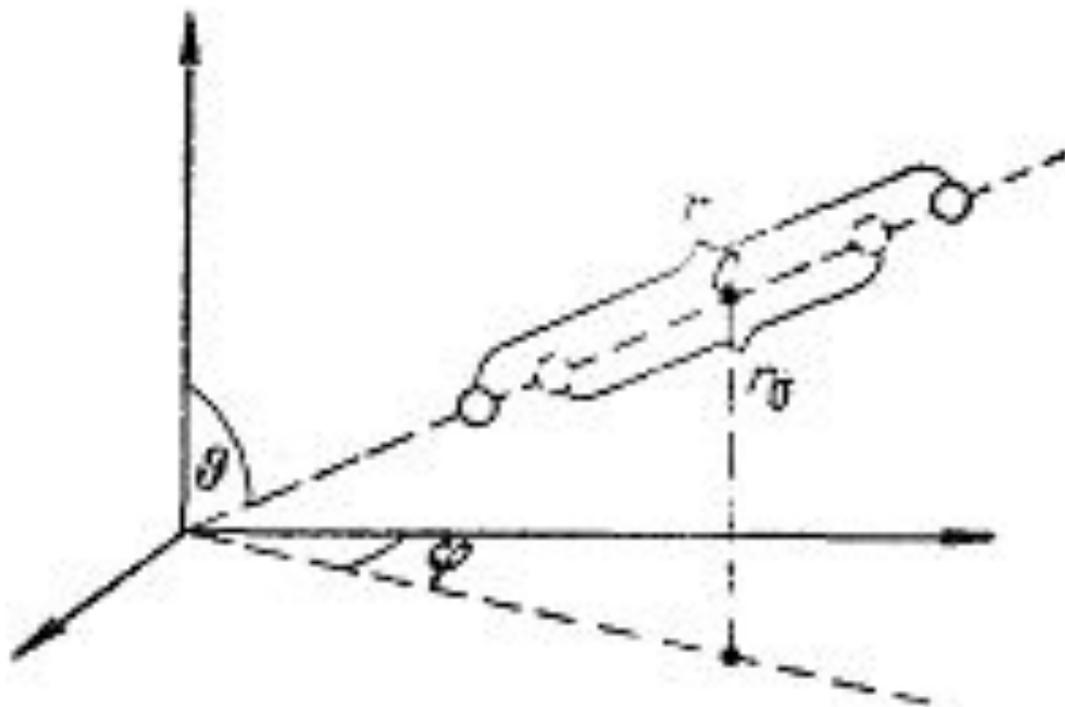


Рис. 232.

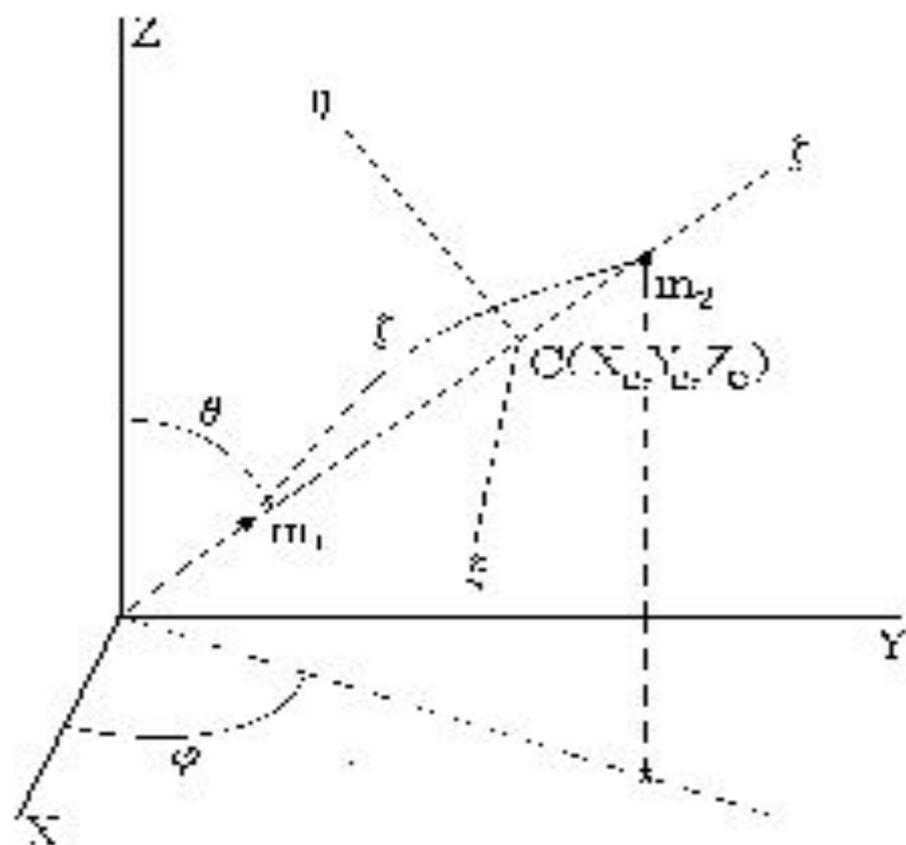


Рис. 1.1. Координаты атомов двухатомной молекулы $X_C, Y_C, Z_C, \theta, \varphi, \zeta$ и ее главные оси ξ, η, ζ .

Число «резервуаров» энергии - i ($i = n_p + n_r + 2n_v$)

n - число поступательных(p), вращательных(r) и колебательных(v) степеней свободы; $n_p = k$ (k -мерность пространства);

а) $n_v = 0$ – жесткая молекула, б) $n_v = (N-1)k - n_r$ – упругая молекула;
 N -число атомов.

Свойства	N \ k	1	2	3
		i		
м. точка	1	1	2	3
лин., ж.	≥ 1	1	3	5
лин., у.	≥ 2	$2N-1$	$4N-3$	$6N-5$
пл-я., ж.	≥ 3	—	3	6
пл-я., у.	≥ 3	—	$4N-3$	$6N-6$
об-я., ж.	≥ 3	—	—	6
об-я., у.	≥ 3	—	—	$6N-6$

Таблица 4

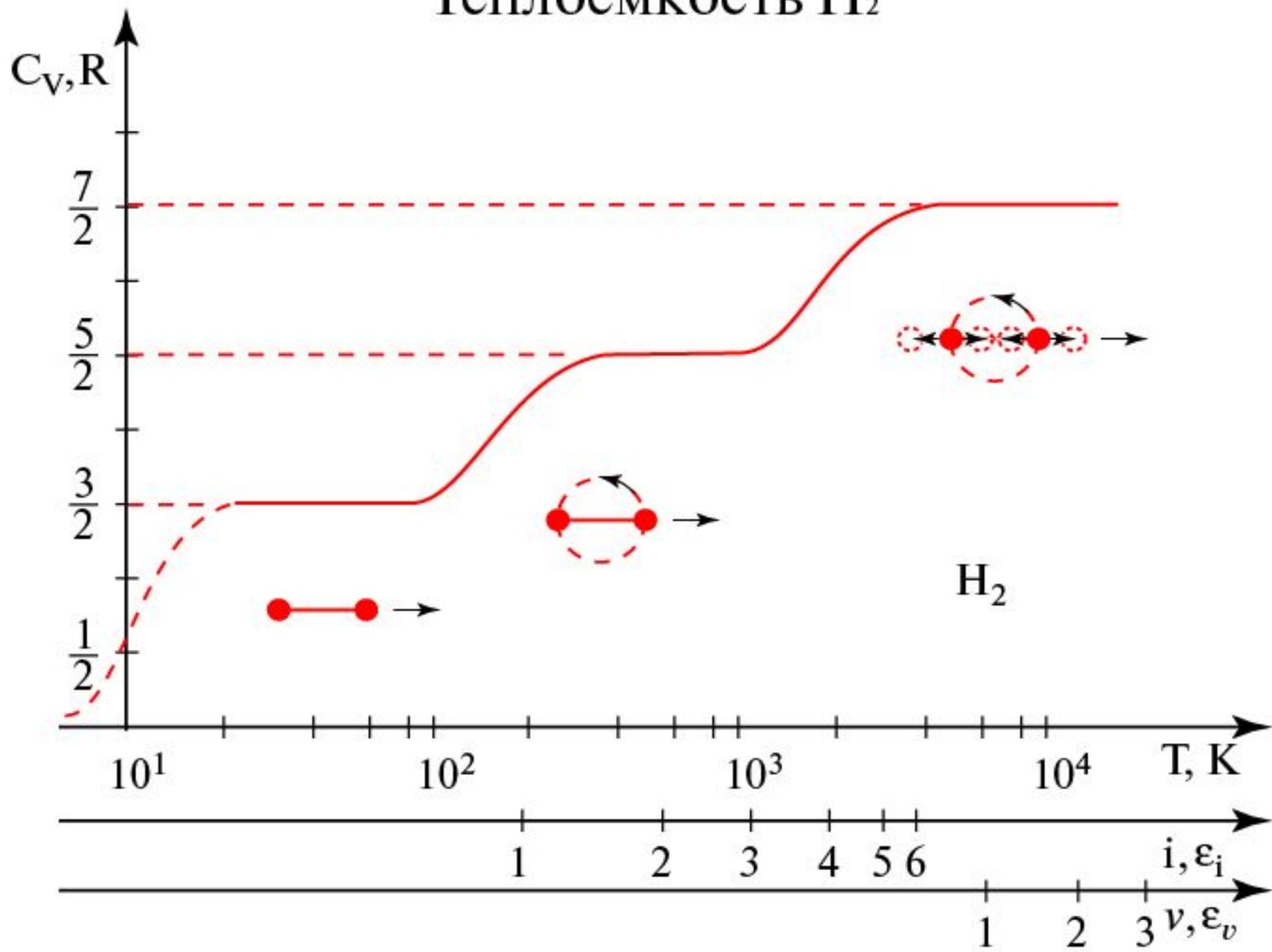
Молекула	Характер связи между атомами	Число степеней свободы			i	C_V	C_P	γ
		поступат.	вращат.	колебат.				
Одноатомная	—	3	—	—	3	$\frac{3}{2} R$	$\frac{5}{2} R$	1,67
Двухатомная	Жесткая	3	2	—	5	$\frac{5}{2} R$	$\frac{7}{2} R$	1,40
»	Упругая	3	2	1	7	$\frac{7}{2} R$	$\frac{9}{2} R$	1,29
С числом атомов три и более	Жесткая	3	3	—	6	$\frac{6}{2} R$	$\frac{8}{2} R$	1,33

Таблица 5

Газ	Количество атомов в молекуле	$C_V \cdot 10^{-3}$ дж/град·кмоль		$C_p \cdot 10^{-3}$ дж/град·кмоль		γ	
		теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.
Гелий (He)	1	12,5	12,5	20,8	20,9	1,67	1,67
Кислород (O ₂) . . .	2	20,8	20,9	29,1	28,9	1,40	1,40
Оксид углерода (CO)	2	20,8	21,0	29,1	29,3	1,40	1,40
Пары воды (H ₂ O)	3	25,0 33,2*)	27,8	33,2 41,5*)	36,2	1,33 1,25*)	1,31

*) Для $i = 8$, т. е. в предположении, что имеется дополнительно одна колебательная степень свободы.

Теплоёмкость H_2



Изо-процессы (1)

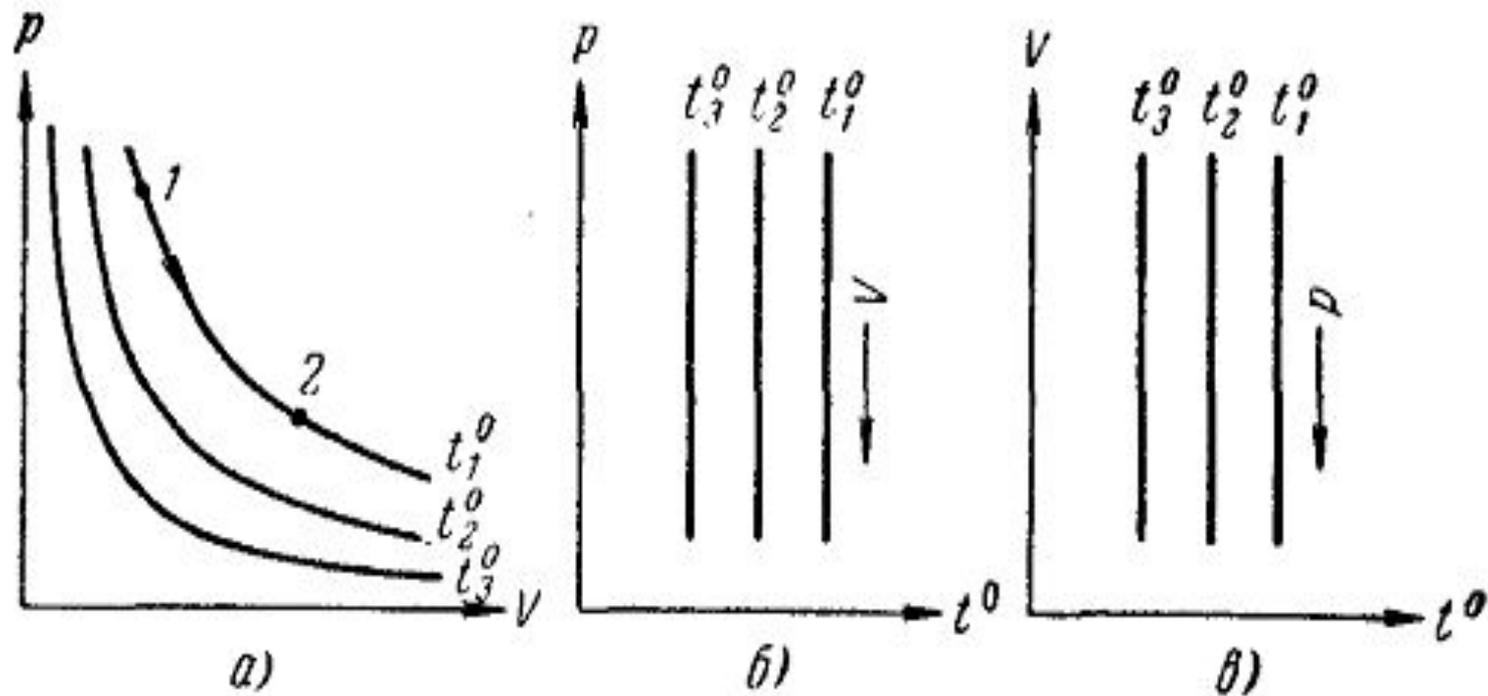


Рис. 216.

Изо-процессы (2)

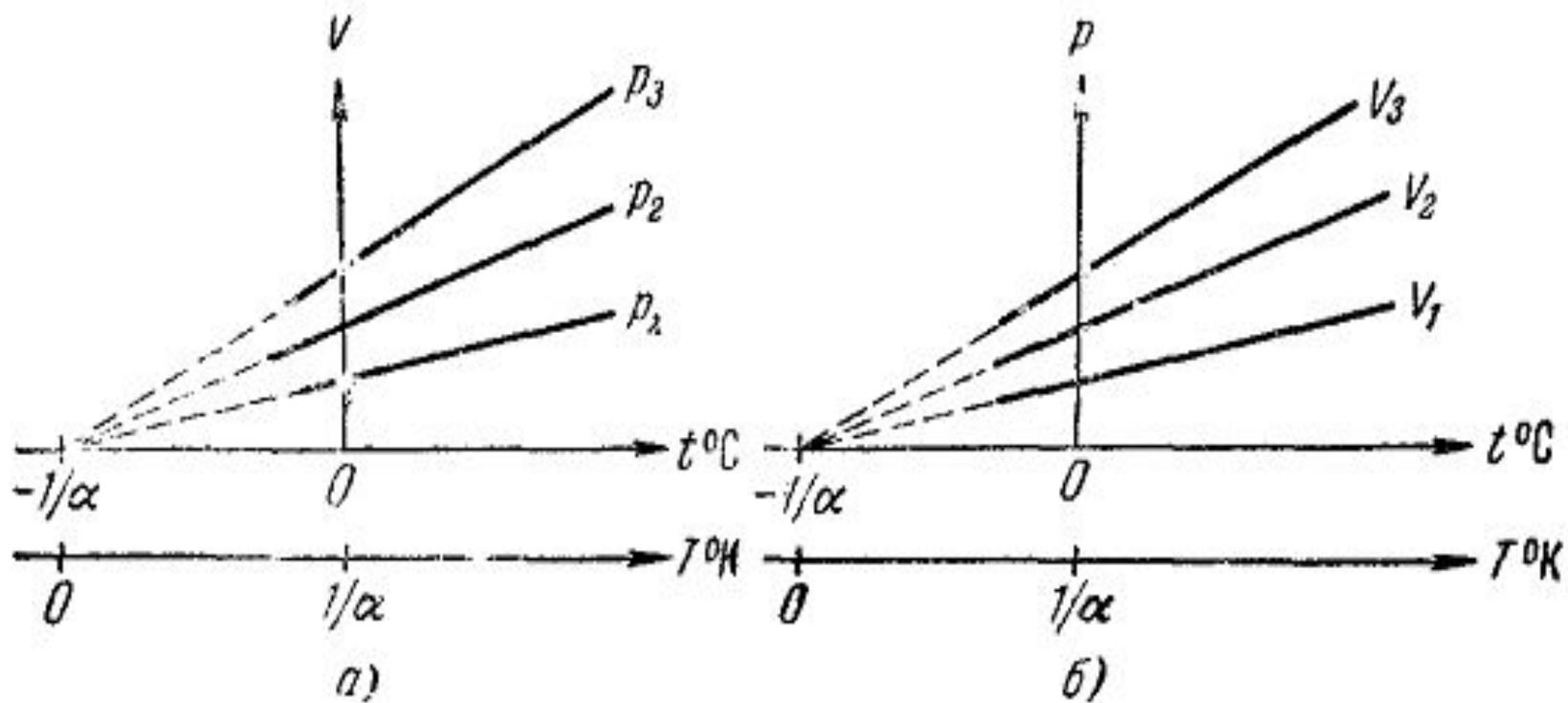


Рис. 217.

Изоэнтропический процесс (1)

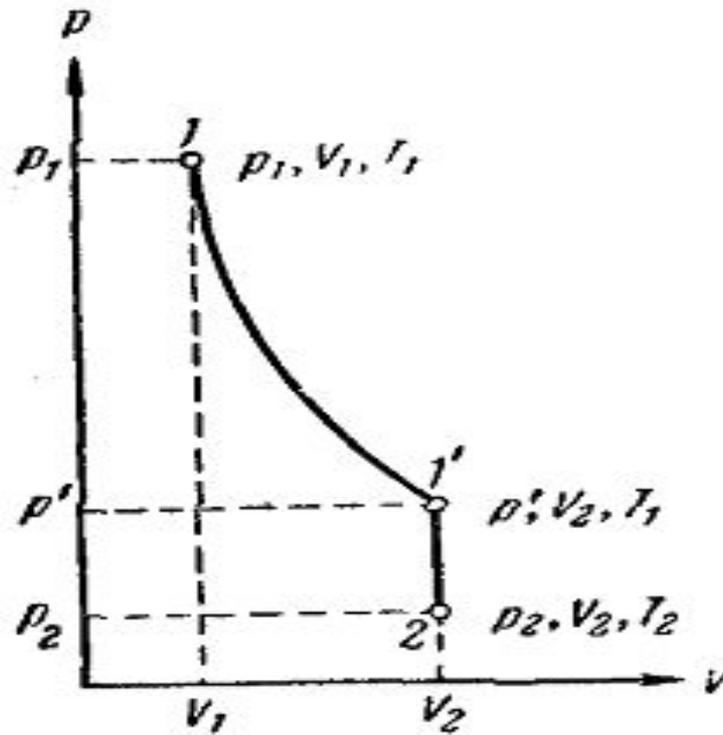


Рис. 218.

Постоянная адиабаты газов

М	T, °C	γ	М	T, °C	γ
He	-180	1,666	HI	100	1,40
Kr	19	1,68	Br ₂	300	1,32
Ar	15	1,668	I ₂	185	1,30
H ₂	100	1,404	NH ₃	15	1,31
O ₂	100	1,399	C ₂ H ₆	15	1,22

Первое начало термодинамики (1)

$$d'Q = dU + d'A ;$$

$$Q_{12} = U_{12} + A_{12} ;$$

$$U = C_V T ; \quad A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV ;$$

$$U_{12} = \Delta U = C_V (T_2 - T_1) . \quad pV^\alpha = p_1 V_1^\alpha$$

$$\begin{aligned} \Delta'A = A_{12} &= p_1 V_1^\alpha \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^\alpha} = p_1 V_1^\alpha \left(\frac{V^{1-\alpha}}{1-\alpha} \right) \Big|_{V_1}^{V_2} = \\ &= \frac{p_1 V_1^\alpha}{1-\alpha} \left(\frac{1}{V_2^{\alpha-1}} - \frac{1}{V_1^{\alpha-1}} \right) = \frac{p_1 V_1}{1-\alpha} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\alpha-1} \right) \end{aligned}$$

a) $\alpha \neq 1$

b) $\alpha = 1 \longrightarrow A_{12} = \lim_{\alpha \rightarrow 1} p_1 V_1 \left(\frac{1-x^{1-\alpha}}{1-\alpha} \right) =$

$$= - p_1 V_1 \frac{x^{\alpha-1} \ln x}{1} \Big|_{\alpha=1} = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Первое начало термодинамики (2)

α	0	1	γ	$\pm \infty$
Пр-сс	P	T	S	V
A_{12}	$p(V_2 - V_1)$	$\nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$	$p_1 V_1 \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\alpha-1} \right) / (\alpha - 1)$	0
ΔU	$\frac{C_V}{R} p(V_2 - V_1)$	0	$-A_{12}$	$\frac{C_V}{R} (p_2 - p_1) V$
Q_{12}	$\frac{C_p}{R} p(V_2 - V_1)$	$\nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$	0	—//—

$$p_1, V_1 \rightarrow p_2, V_2$$

Лекция 7

1. Работа, совершаемая молекулами газа при политропических процессах.

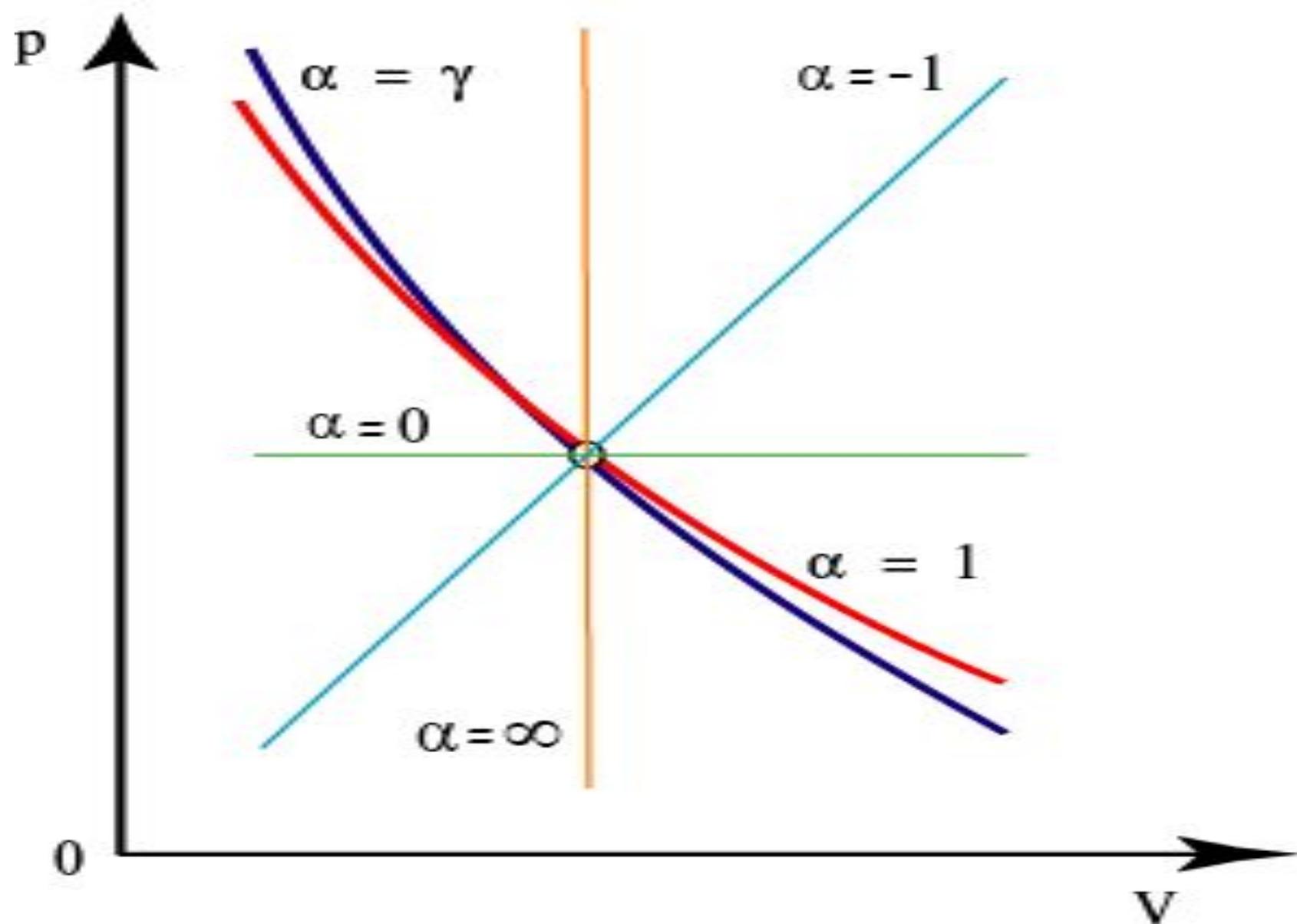
2. Ван-дер-Ваальсовский газ. Внутренняя энергия газа. Уравнение состояния.

3. Функция распределения Максвелла для составляющих скорости и модуля скорости молекул. Функция распределения молекул по энергиям. Γ -функция.

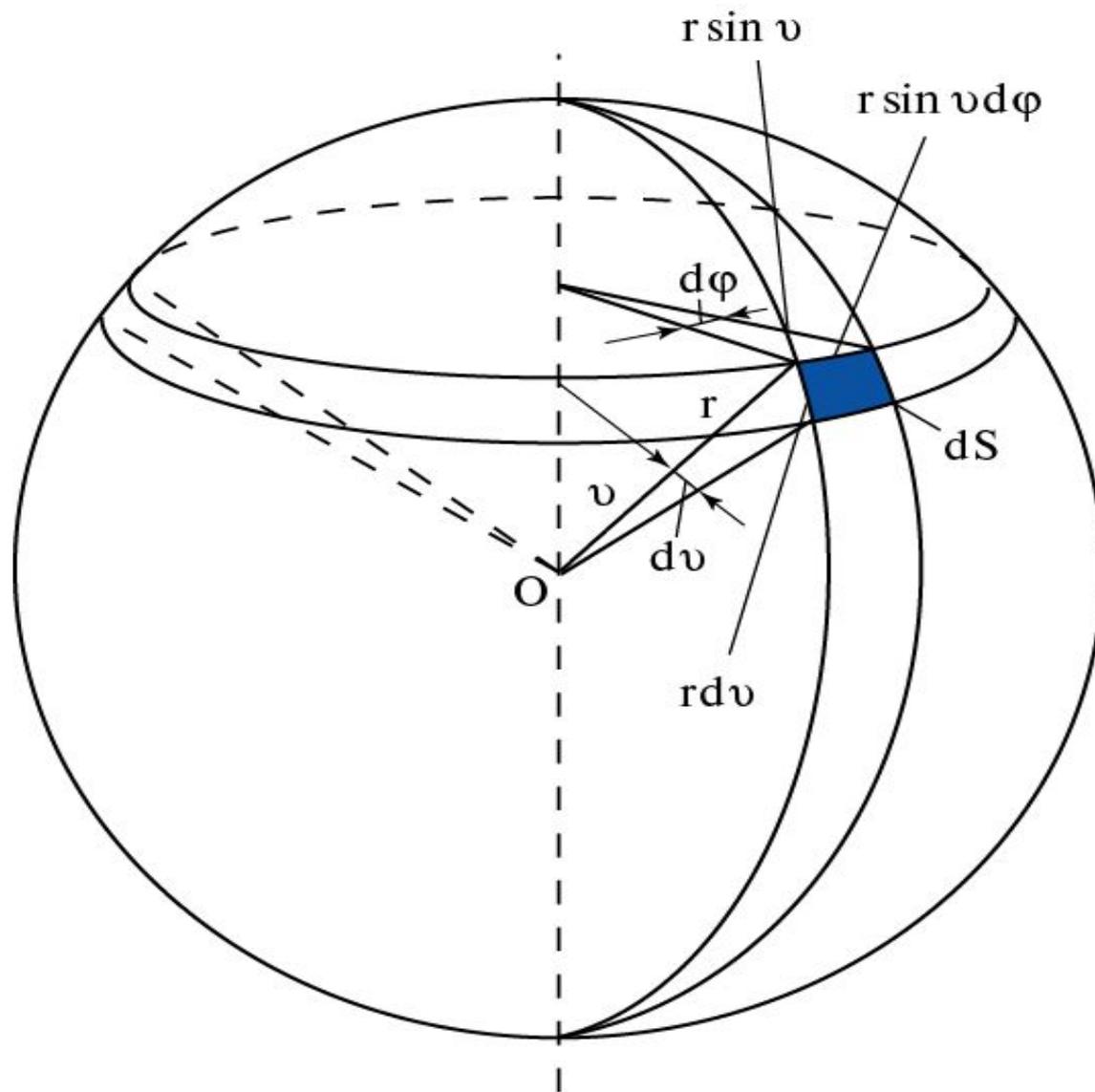
4. Средняя арифметическая, средняя квадратичная и наиболее вероятная скорости молекул. Средние значения параметров газа, связанных с энергией молекул.

5. Демонстрации: Int2, Demo-NGU, St_Phys.

Зависимость давления от величины объема $p(V)$ для политропических процессов.



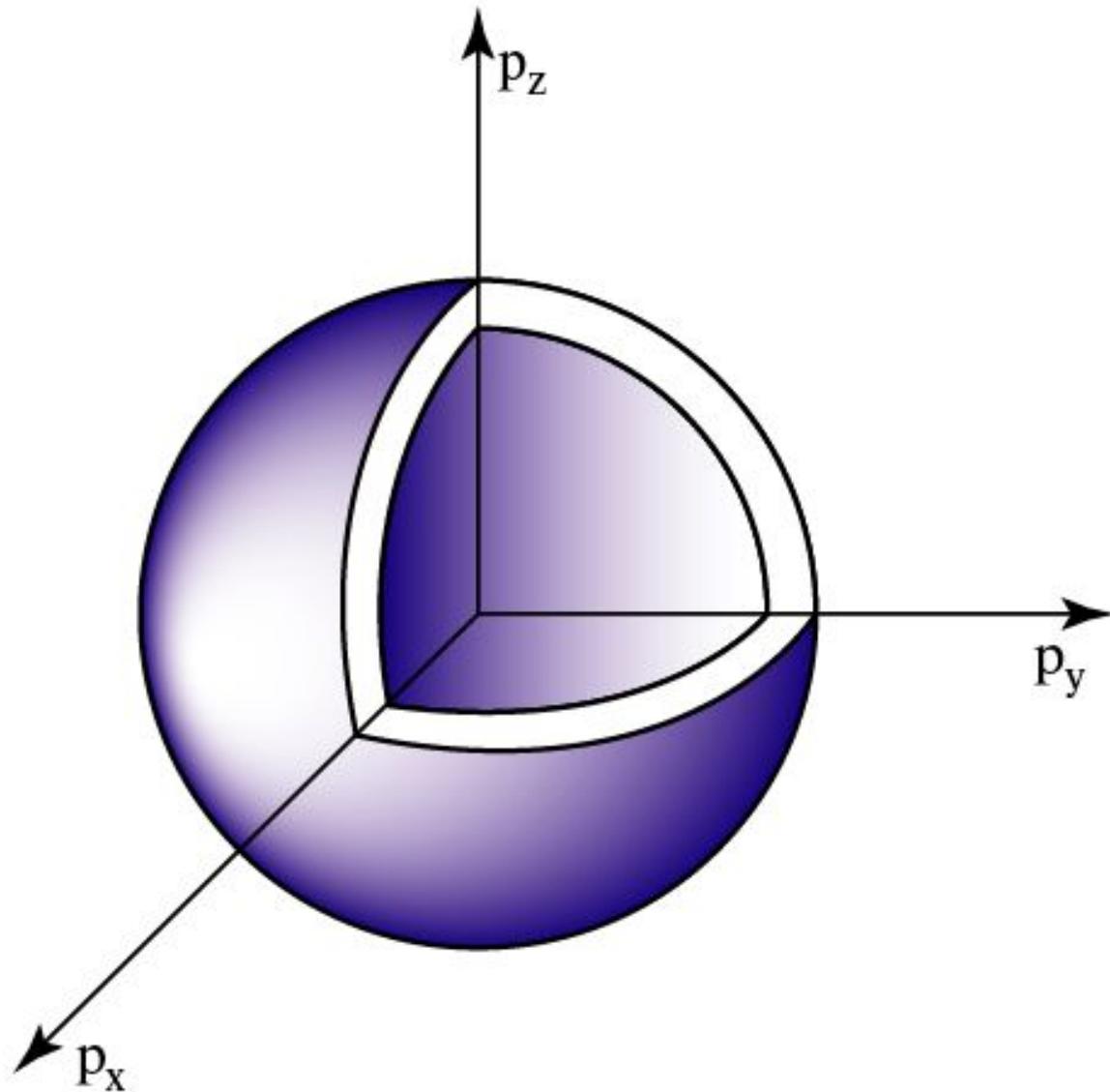
Сферическая система координат



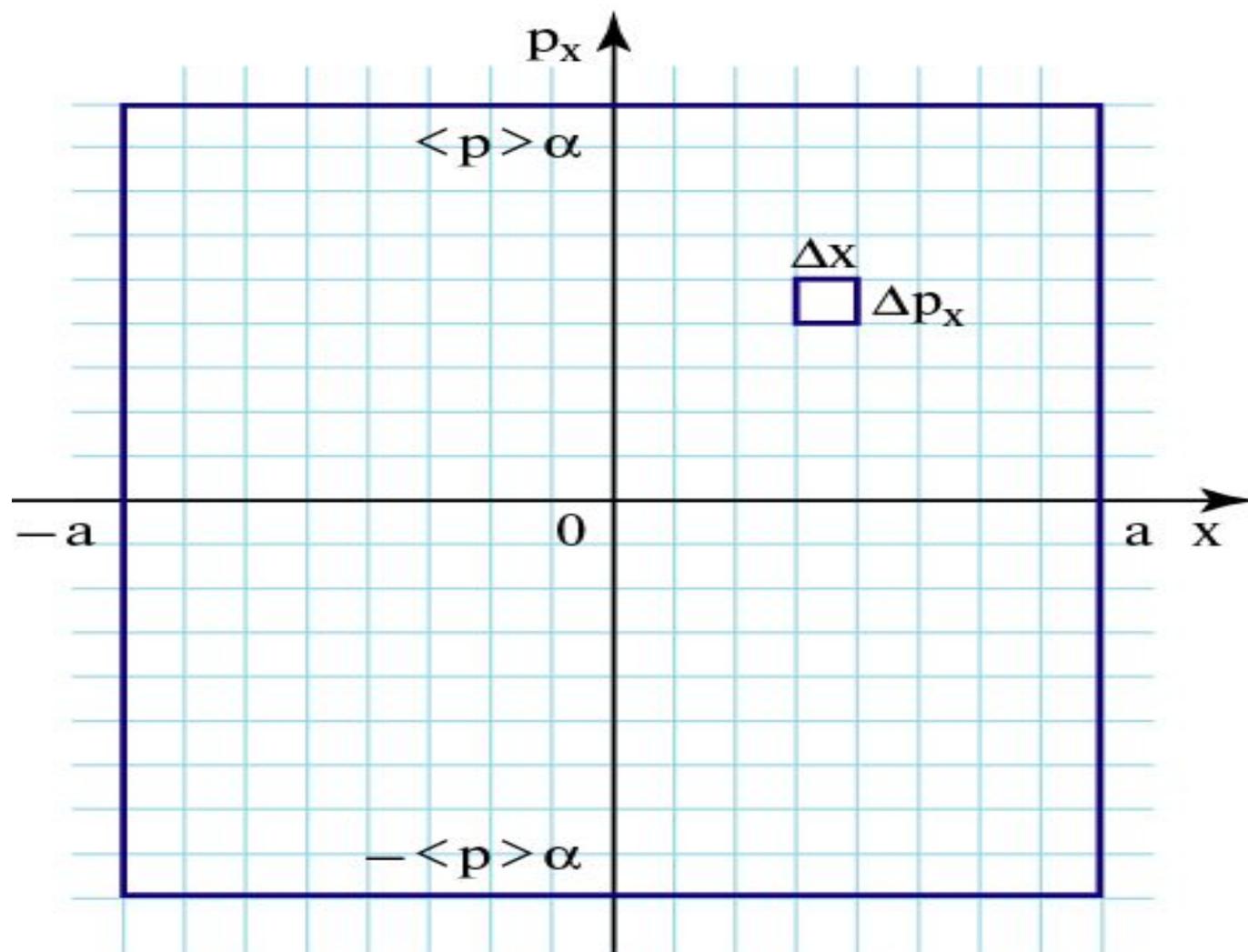
$$dS = r d\nu r \sin \nu d\varphi ;$$

$$dV = r d\nu r \sin \nu d\varphi dr$$

Система координат в пространстве импульсов



Фазовое пространство (\vec{r}, \vec{p})



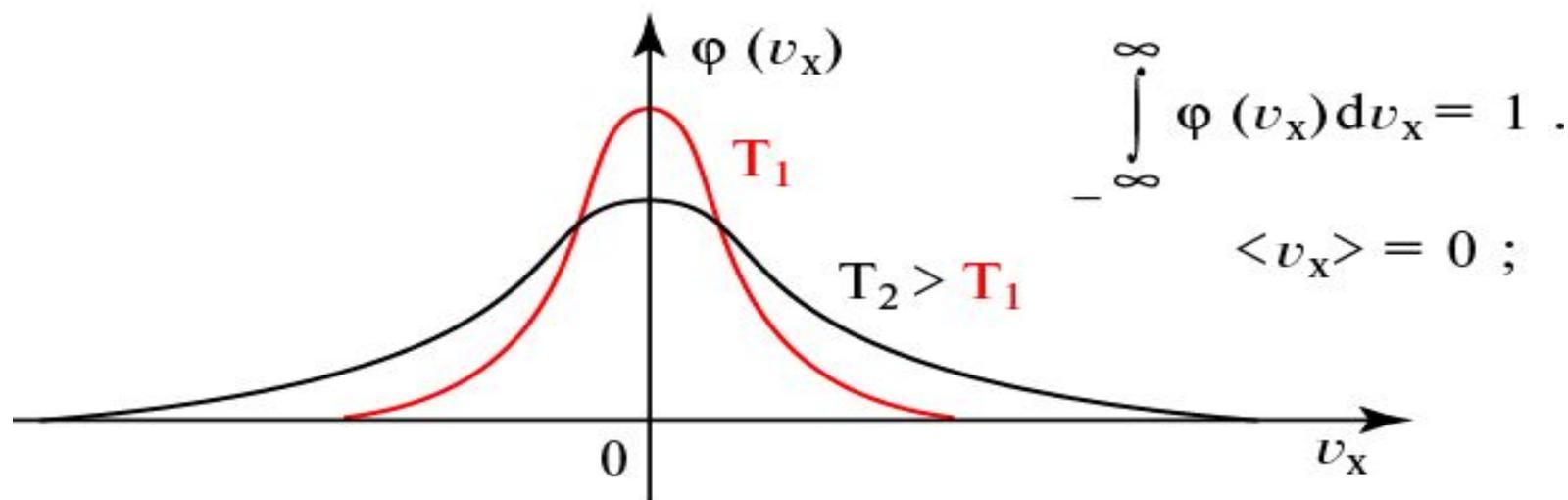
$$-a \leq x \leq a \quad , \quad -b \leq y \leq b \quad , \quad -c \leq z \leq c ;$$

$$-\alpha \leq p_x \leq \alpha \quad , \quad -\alpha \leq p_y \leq \alpha \quad , \quad -\alpha \leq p_z \leq \alpha .$$

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar \quad , \quad \Delta p_y \Delta y \geq \hbar \quad , \quad \Delta p_z \Delta z \geq \hbar .$$

Распределение Максвелла (1)

$$\varphi(v_x) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2} e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}};$$

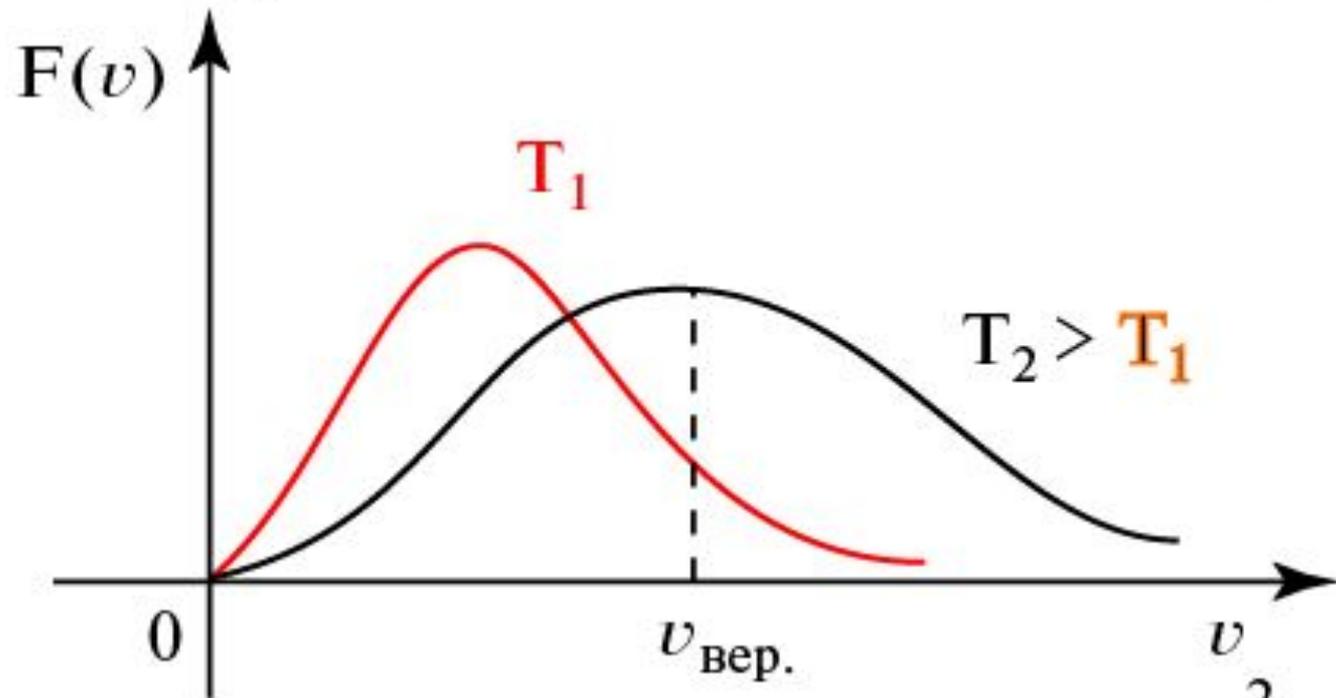


$$F(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2;$$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}; \quad v_{\text{вер.}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\mu}};$$

$$v_{\text{ср. кв.}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\mu}} .$$

Распределение Максвелла (2)



$$F(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} ; \quad v_{\text{вер.}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\mu}}$$

$$v_{\text{ср. кв.}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\mu}} .$$

Относительное количество частиц

Таблица 7

$\frac{v}{v_{\text{вер}}}$	$\frac{\Delta N}{N} \cdot \%$	$\frac{v}{v_{\text{вер}}}$	$\frac{\Delta N}{N} \cdot \%$
0-0,5	8,1	2-3	4,6
0,5-1,5	70,7	>3	0,04
1,5-2	16,6	>5	$8 \cdot 10^{-9}$

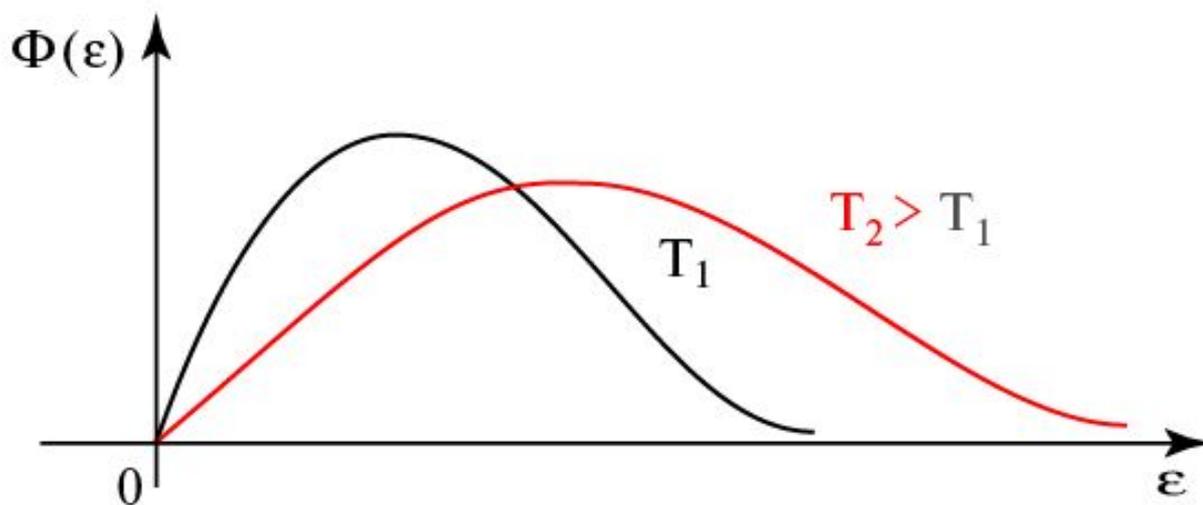
Статистические распределения в системе частиц (1)

$$F(v)dv = 4\pi v^2 \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv = \Phi(\varepsilon) d\varepsilon .$$

$$\varepsilon = \frac{mv^2}{2} , \quad d\varepsilon = mv dv .$$

$$4\pi v^2 \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} e^{-\frac{\varepsilon}{kT}} dv = \Phi(\varepsilon) mv dv ;$$

$$\Phi(\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\varepsilon}{(kT)^3}} e^{-\frac{\varepsilon}{kT}} .$$



Опыт Ламмерта

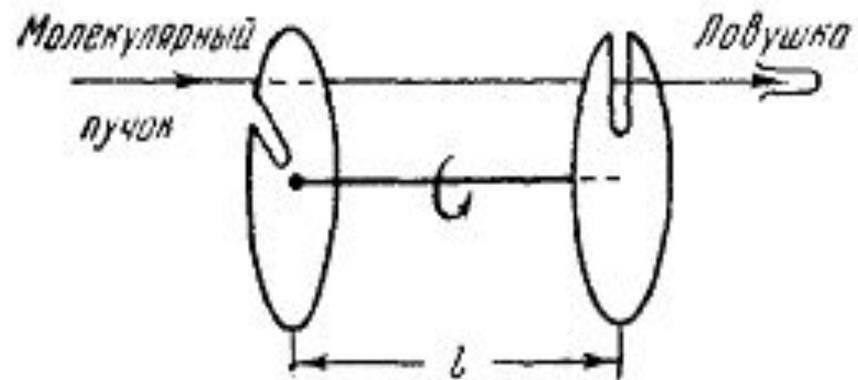


Рис. 243.

Опыт Штерна

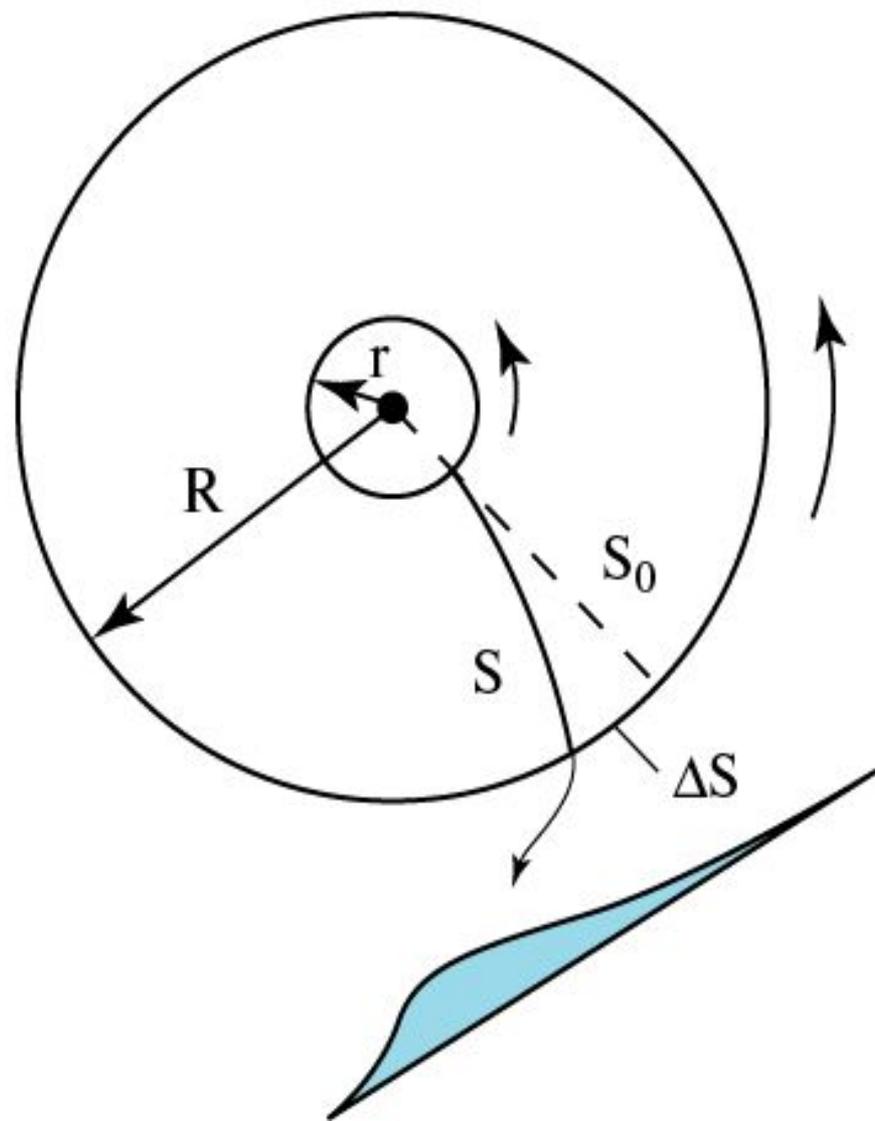
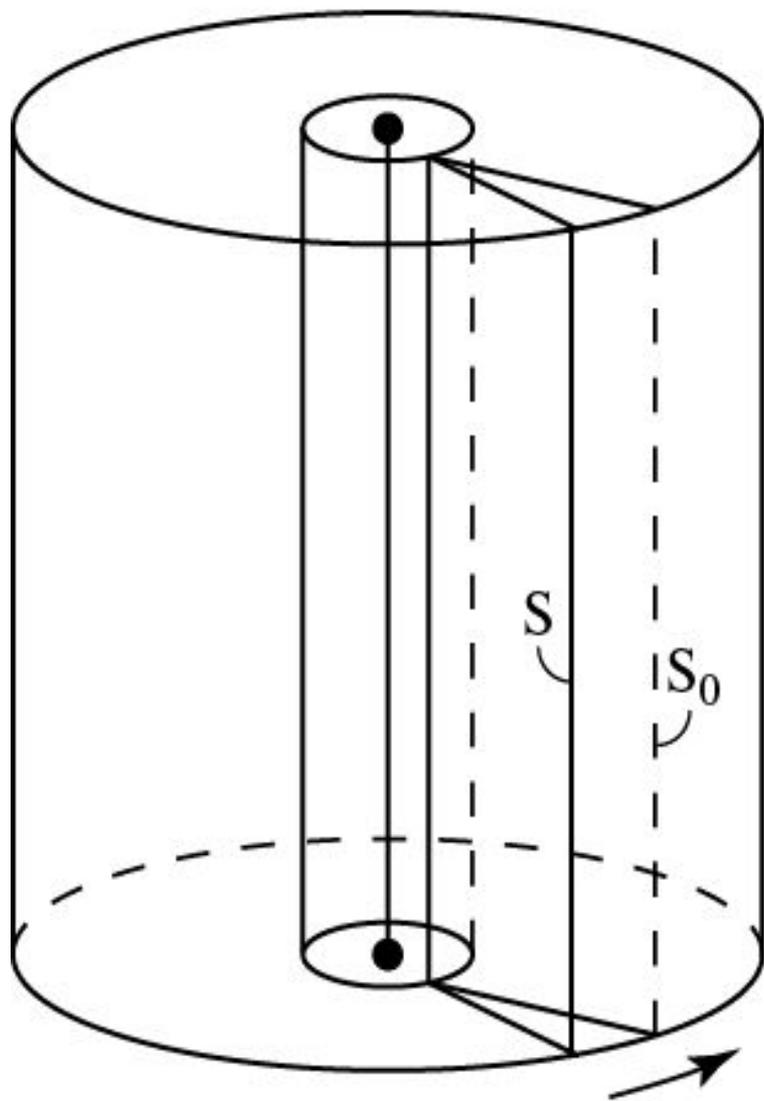
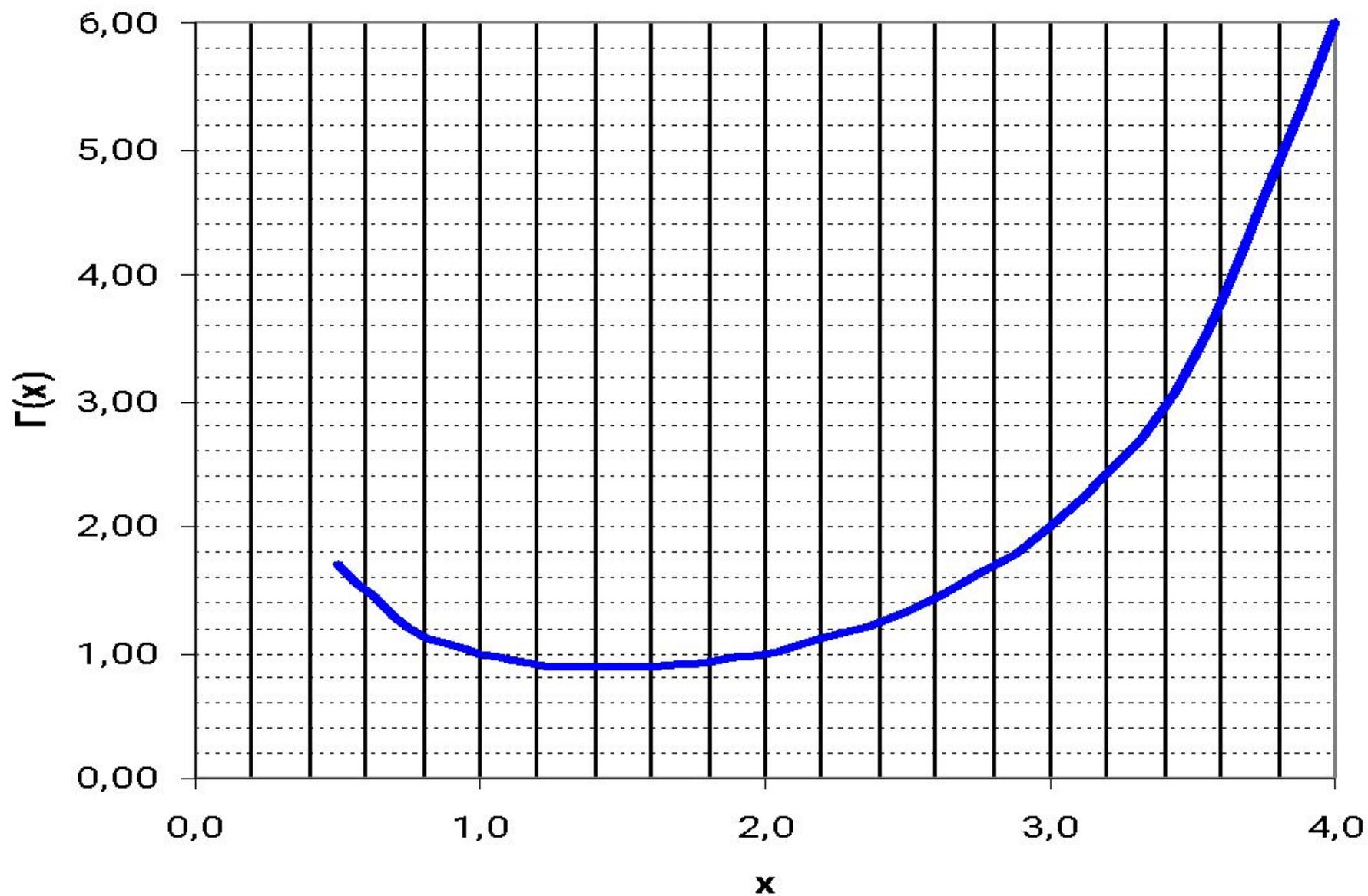


График гамма-функции



Лекция 8

1. Распределение Больцмана. Распределение молекул по координатам в потенциальном поле сил.
2. Барометрическая формула. опыты Перрена.
3. Броуновское движение. Формула Эйнштейна-Смолуховского.
4. Распределение Больцмана в случае дискретного энергетического спектра.
5. Распределение Гиббса. Распределение Максвелла-Больцмана. Статистические распределения.
6. Демонстрации: Int2, Demo-NGU, Brawn.

К выводу распределения Больцмана

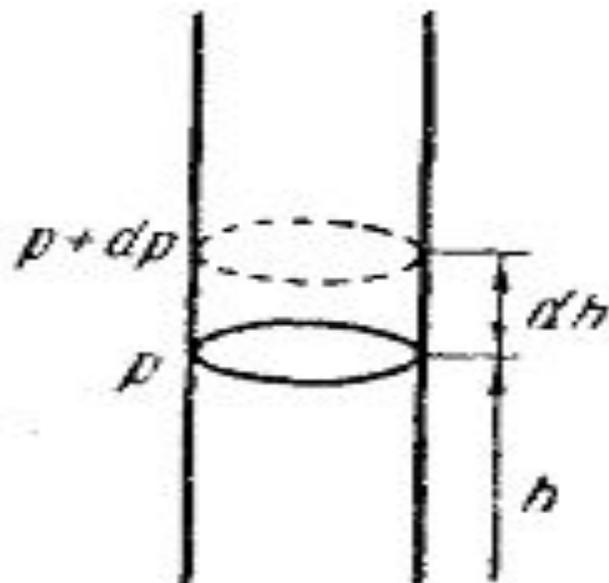
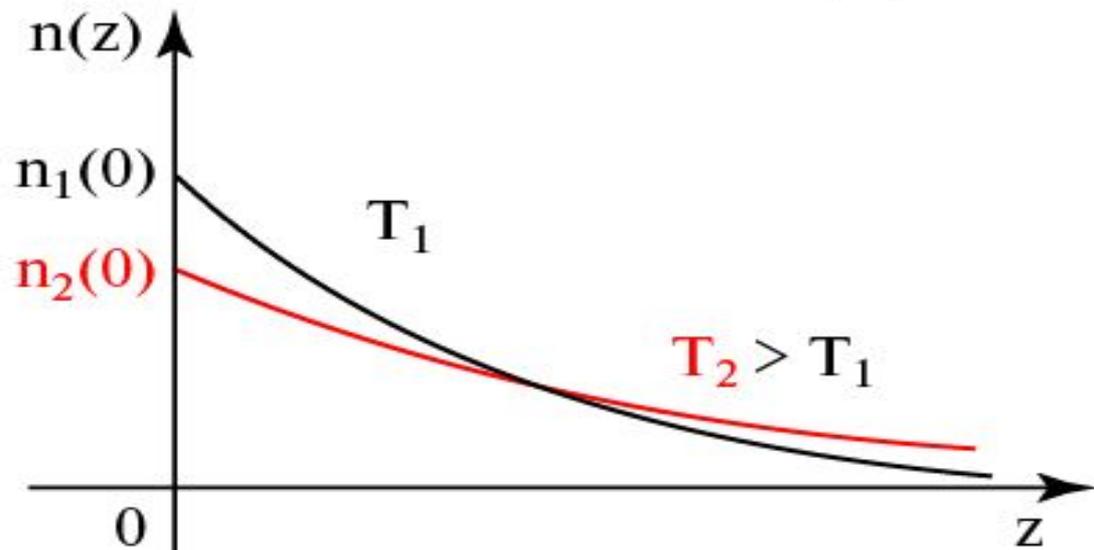


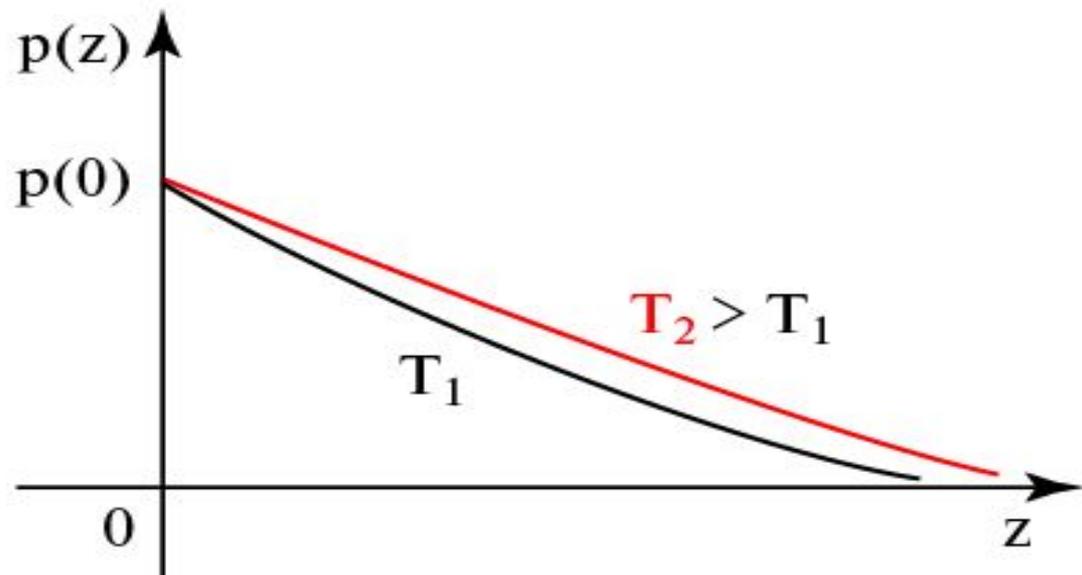
Рис. 244.

Распределение Больцмана (1)

$$\frac{n_1(0)}{n_2(0)} = \frac{T_2}{T_1}$$



$$p_1(0) = p_2(0)$$



Распределение Больцмана (2)

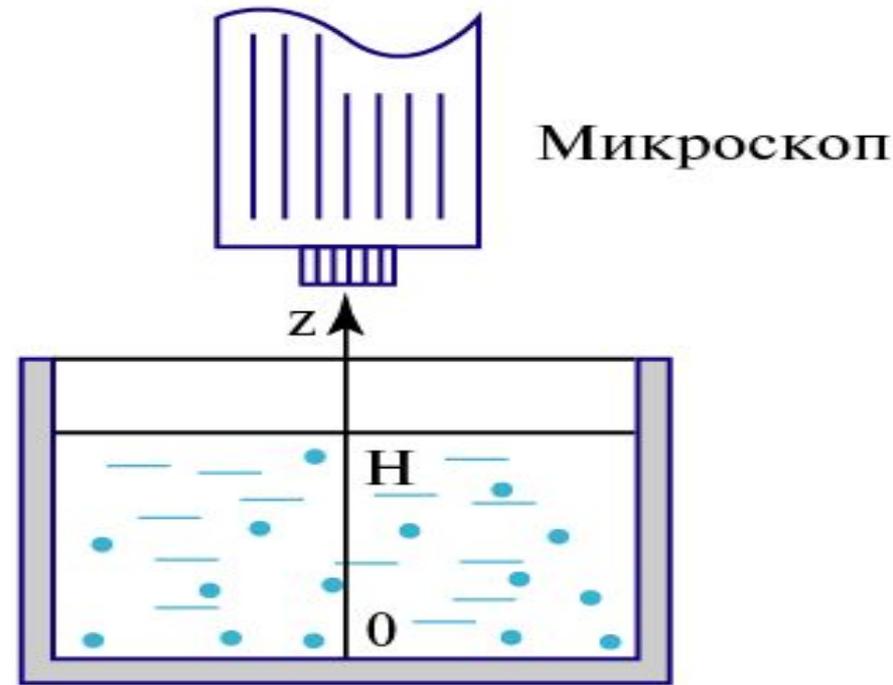
$$p_i = \frac{m_i g N_i}{S} \quad ; \quad p = \sum p_i = \sum n_i(0) kT = n(0) kT .$$

$$p = p(0) e^{-\frac{m_i g z}{kT}} \quad (T = \text{const}) .$$

$$\langle z_i \rangle = \int_0^{\infty} z e^{-\frac{m_i g z}{kT}} dz \Big/ \int_0^{\infty} e^{-\frac{m_i g z}{kT}} dz =$$

$$= \frac{kT}{m_i g} \int_0^{\infty} x e^{-x} dx \Big/ \int_0^{\infty} e^{-x} dx = \frac{kT}{m_i g} \sim \frac{1}{m_i} .$$

Опыт Перрена (1909)

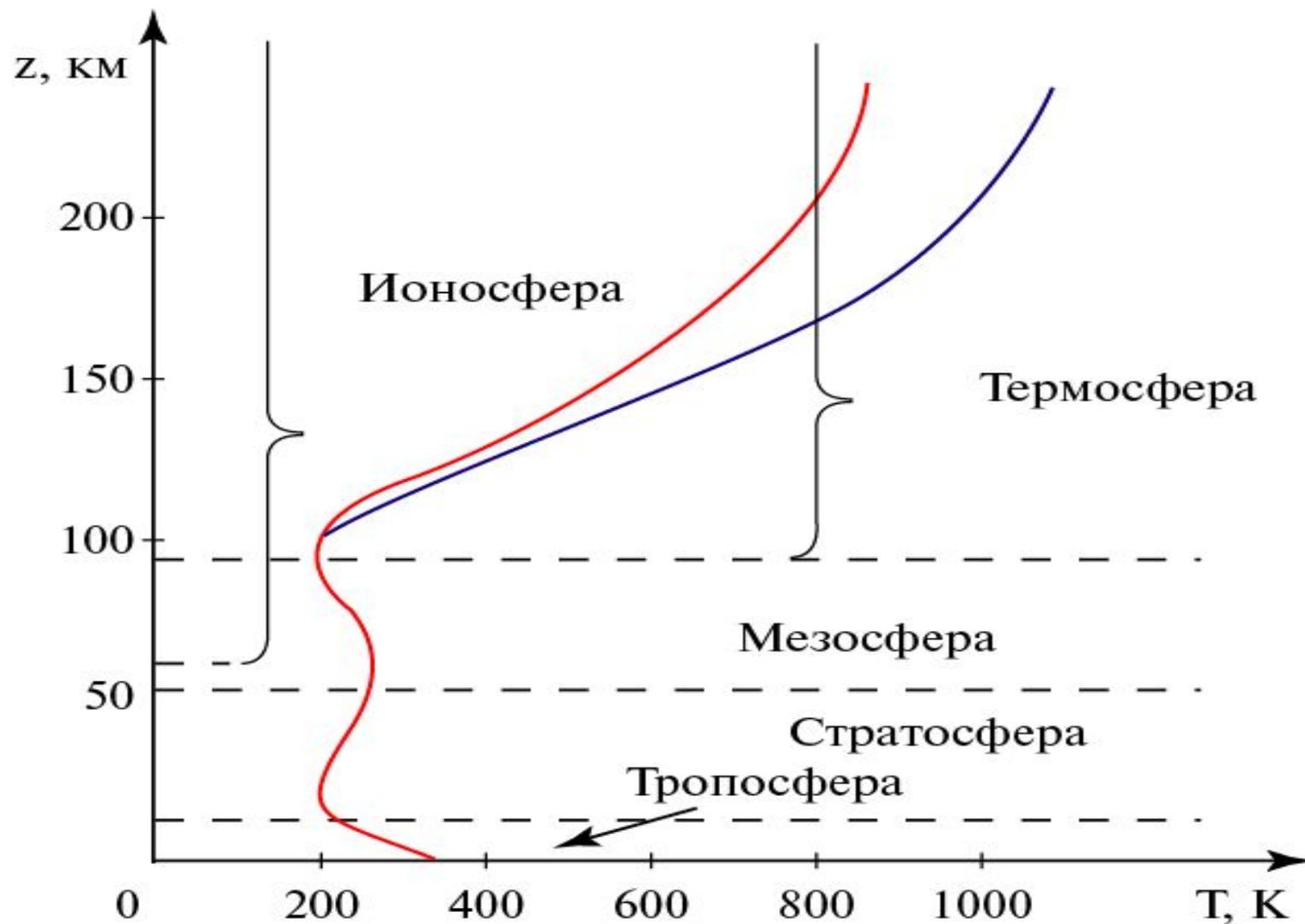


$$\Delta N = \int_z^{z+\Delta z} n(z') S dz' = n(0) S \frac{kT}{mg} \left(e^{-\frac{mgz}{kT}} - e^{-\frac{mg(z+\Delta z)}{kT}} \right) \approx$$
$$\approx n(0) S \Delta z e^{-\frac{mgz}{kT}};$$

$$n(0) = \frac{mgN}{kTS} / \left(1 - e^{-\frac{mgH}{kT}} \right);$$

$$\Delta N = N \frac{\Delta z}{H} e^{-\frac{mgz}{kT}}. \quad (mgH \ll kT)$$

Распределение температуры в атмосфере Земли



- Низкая активность Солнца
- Высокая активность Солнца

Броуновское движение (модель Эйнштейна-Смолуховского)

$$M\ddot{x} = -r\dot{x} + F_x;$$

$$Mx\ddot{x} = -rx\dot{x} + F_x x;$$

$$(x^2)''_t = 2x\dot{x};$$

$$(x^2)''_{tt} = 2(\dot{x})^2 + 2x\ddot{x};$$

$$x\ddot{x} = \frac{1}{2} (x^2)''_{tt} - (\dot{x})^2 .$$

$$\frac{M}{2} (\ddot{x}) - M\dot{x}^2 + rx\dot{x} = F_x x .$$

$$\langle x \rangle = 0 \quad , \quad F_x = \text{const} .$$

$$\frac{M}{2} \langle \ddot{x}^2 \rangle - M \langle \dot{x}^2 \rangle + \frac{r}{2} \langle \dot{x}^2 \rangle = F_x \langle x \rangle = 0 .$$

$$\langle \ddot{x}^2 \rangle - \frac{2kT}{M} + \frac{r}{M} \langle \dot{x}^2 \rangle = 0 ;$$

$$\langle \ddot{x}^2 \rangle + \frac{r}{M} \langle \dot{x}^2 \rangle = \frac{2kT}{M} ;$$

$$\langle x^2 \rangle \Big|_{t=0} = 0 ; \quad \langle \dot{x}^2 \rangle \Big|_{t=0} = 0 .$$

$$\langle x^2 \rangle = \frac{2kT}{M} t \left[1 - \frac{M}{rt} (1 - e^{-\frac{r}{M}t}) \right] \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{2kT}{r} t - \frac{2kTM}{r^2} . \quad (rt \gg M)$$

$$\langle x^2 \rangle = \frac{\langle R^2 \rangle}{M} \Rightarrow \langle R^2 \rangle = At + B ;$$

$$A = \frac{6kT}{r} : \quad B = \frac{6kTM}{r^2} .$$

r, k, M, T : a) $(T, M) \rightarrow (r, k)$.

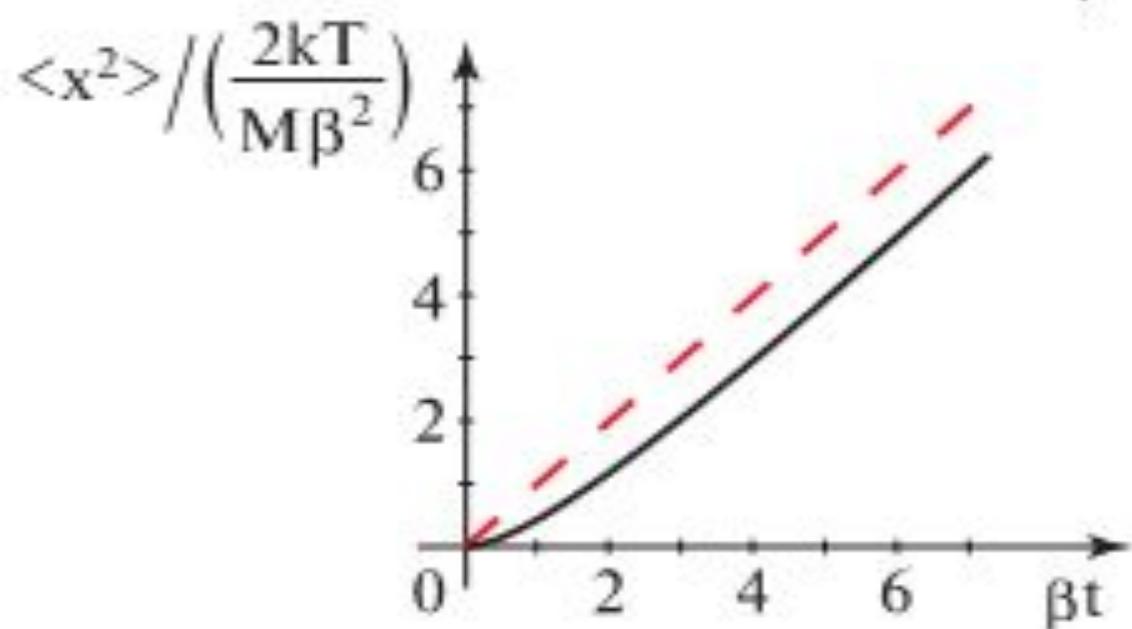
$$r = -\frac{A}{B} M , \quad k = -\frac{A^2 M}{6BT} M .$$

$$\text{a) } t = 0 \Rightarrow \langle x^2 \rangle = 0 \quad \therefore c_2 = -c_1;$$

$$\text{b) } \frac{d}{dt} \langle x^2 \rangle = 2\langle x \rangle \langle \dot{x} \rangle = 0 \quad \therefore c_1 = \frac{2kT}{M\beta^2};$$

$$\langle x^2 \rangle = \frac{2kT}{M\beta^2} (\beta t - (1 - e^{-\beta t}));$$

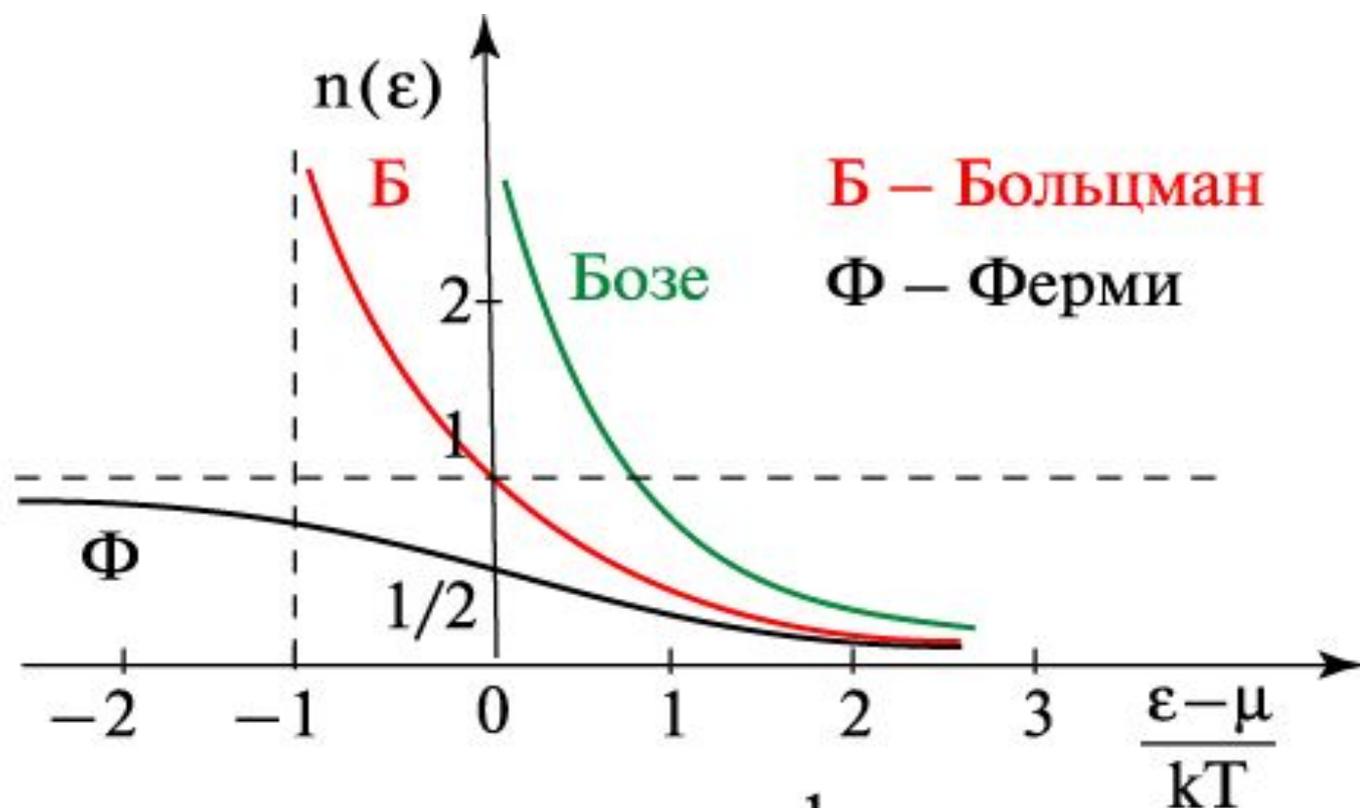
$$\beta t \gg 1 \Rightarrow \langle x^2 \rangle \approx \frac{2kT}{M\beta}.$$



Лекция 9

1. Макро- и микросостояния систем. Статистический вес. Вероятностная интерпретация статистического веса.
2. Абсолютная и относительная флуктуации термодинамических величин.
3. Энтропия, её смысл и основные свойства. Второе начало термодинамики. Статистическая интерпретация второго начала.
4. Природа необратимых процессов. Теорема Нернста.
5. Демонстрации: Int2, Demo-NGU, Brawn.

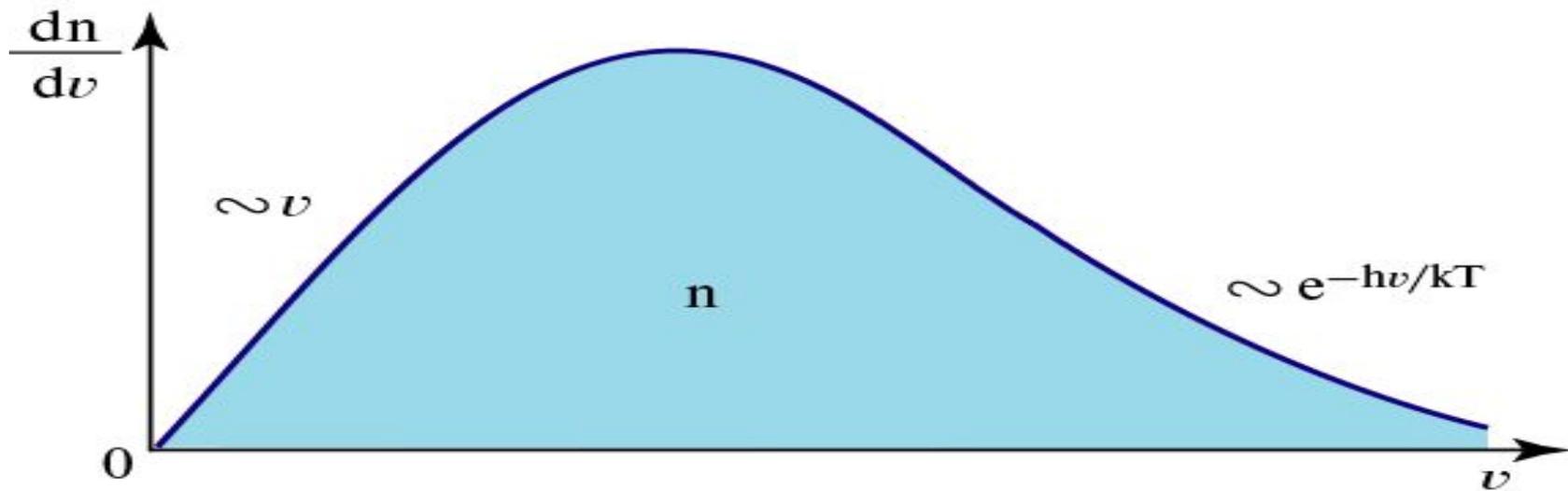
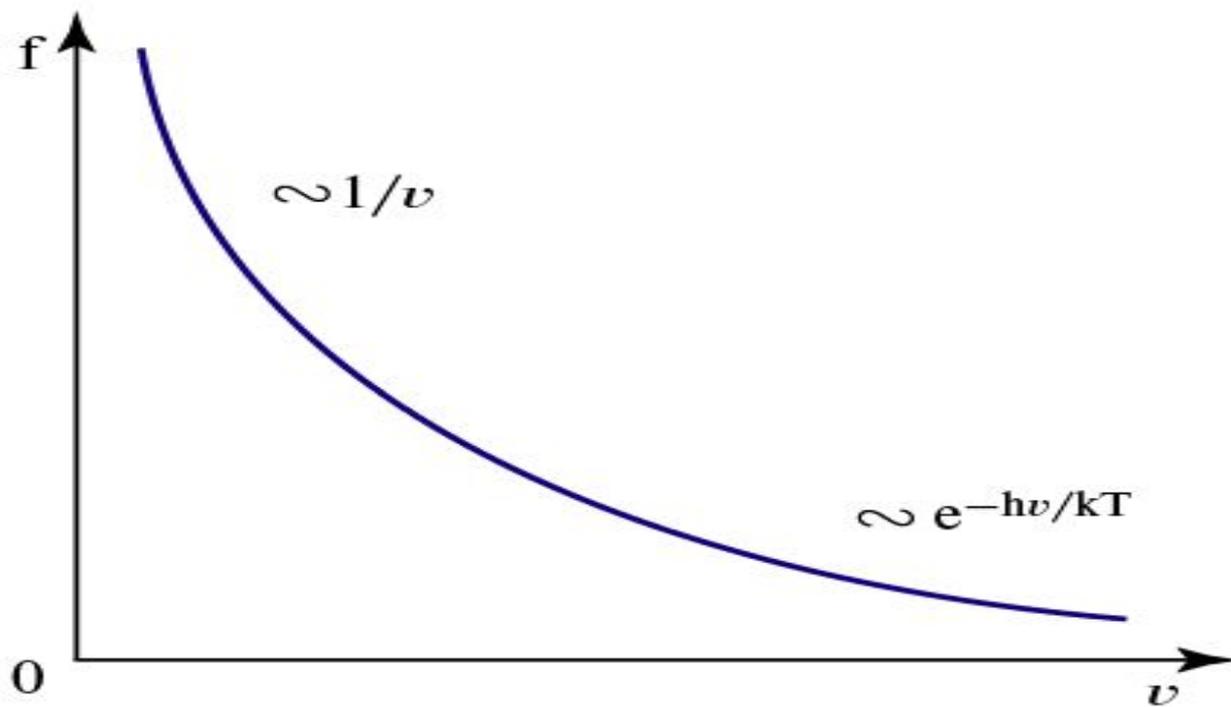
Статистические распределения в системе частиц (2)



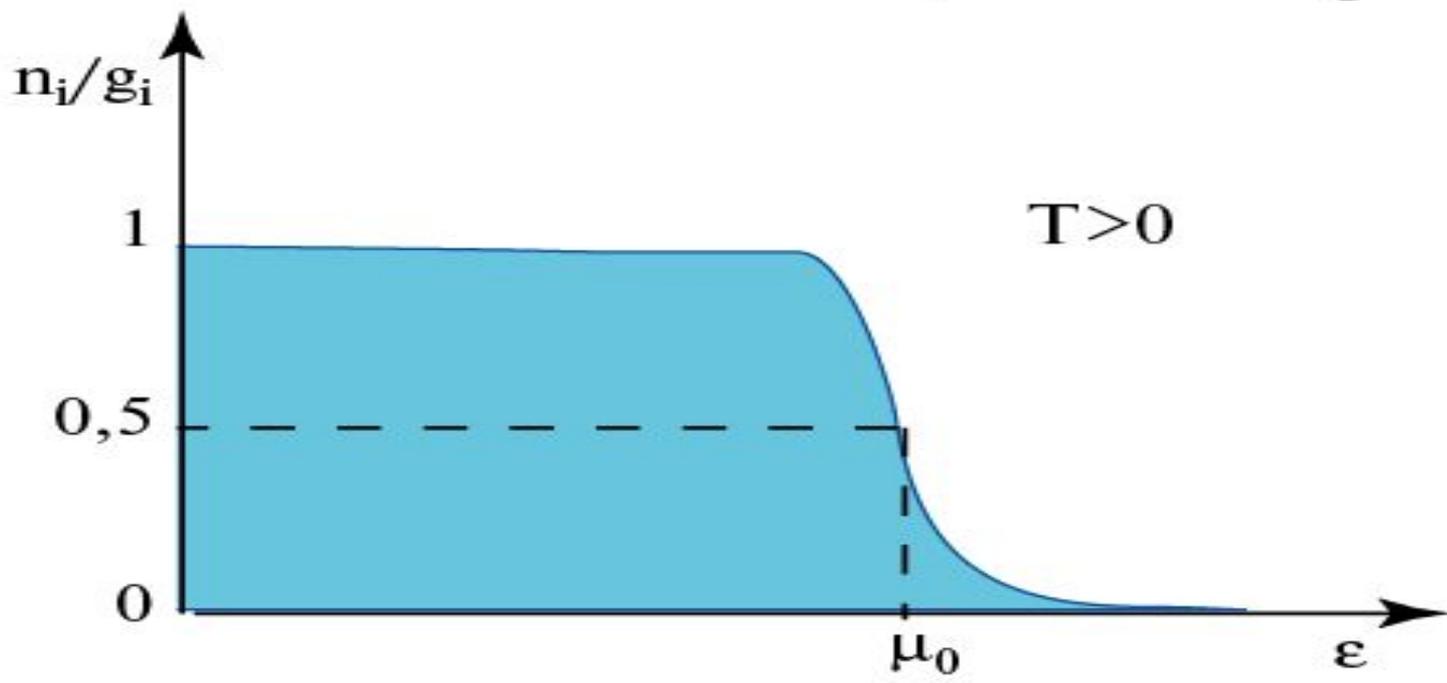
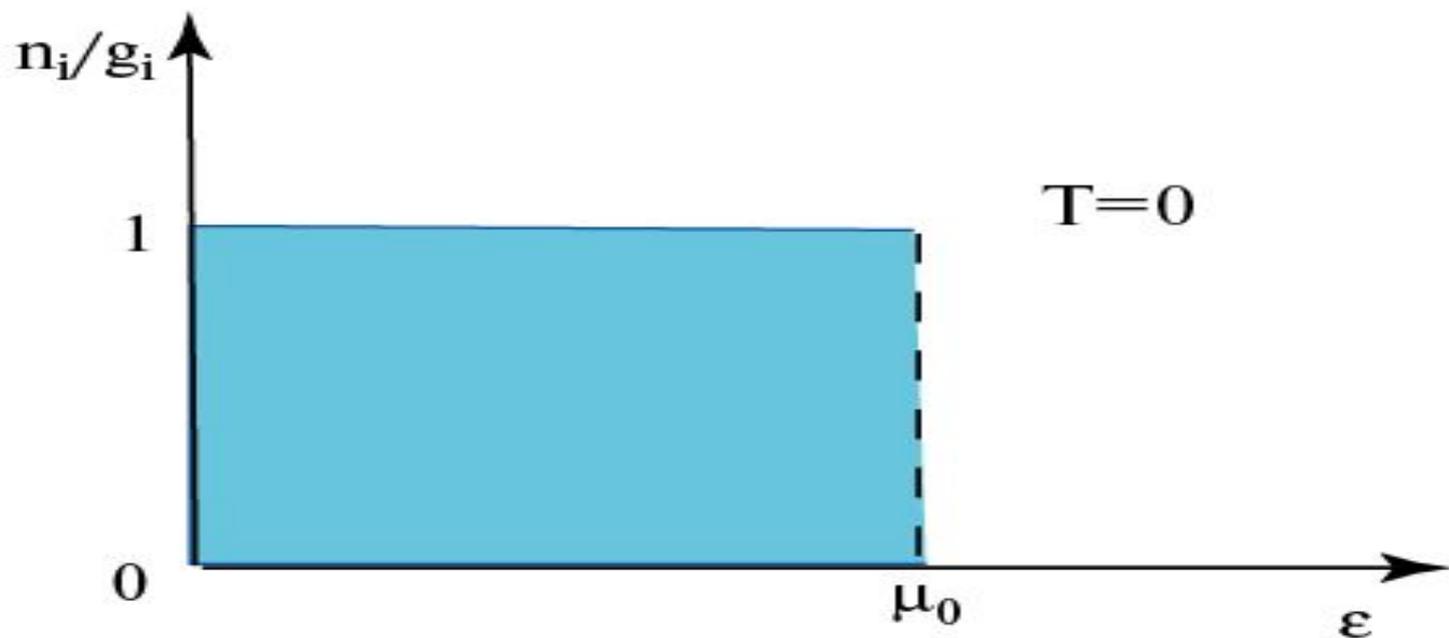
$$n(\epsilon) = \frac{1}{e^{\frac{\epsilon - \mu}{kT}} \pm 1}$$

μ – хим. потенциал ($\mu = 0 \rightarrow$ Бозе распределение)

Распределение Бозе-Эйнштейна



Распределения Ферми-Дирака



Лекция 10

1. Связь между приращением энтропии и получаемой системой теплотой. Неравенство Клаузиуса.

2. Энтропия идеального газа.

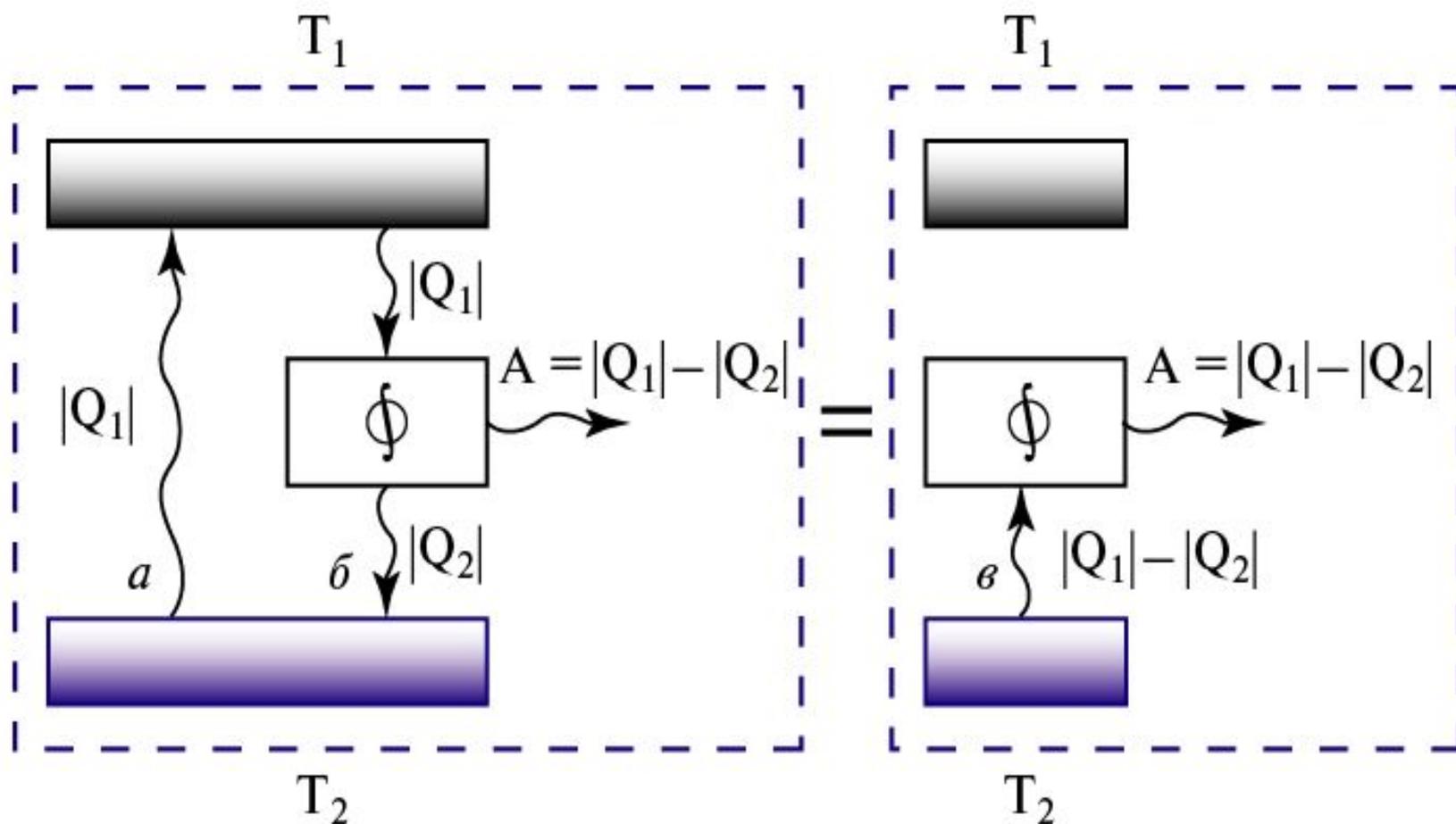
3. Второе начало термодинамики. Формулировки Клаузиуса и Кельвина второго начала термодинамики.

4. Коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины. Цикл Карно и его КПД. Холодильный коэффициент.

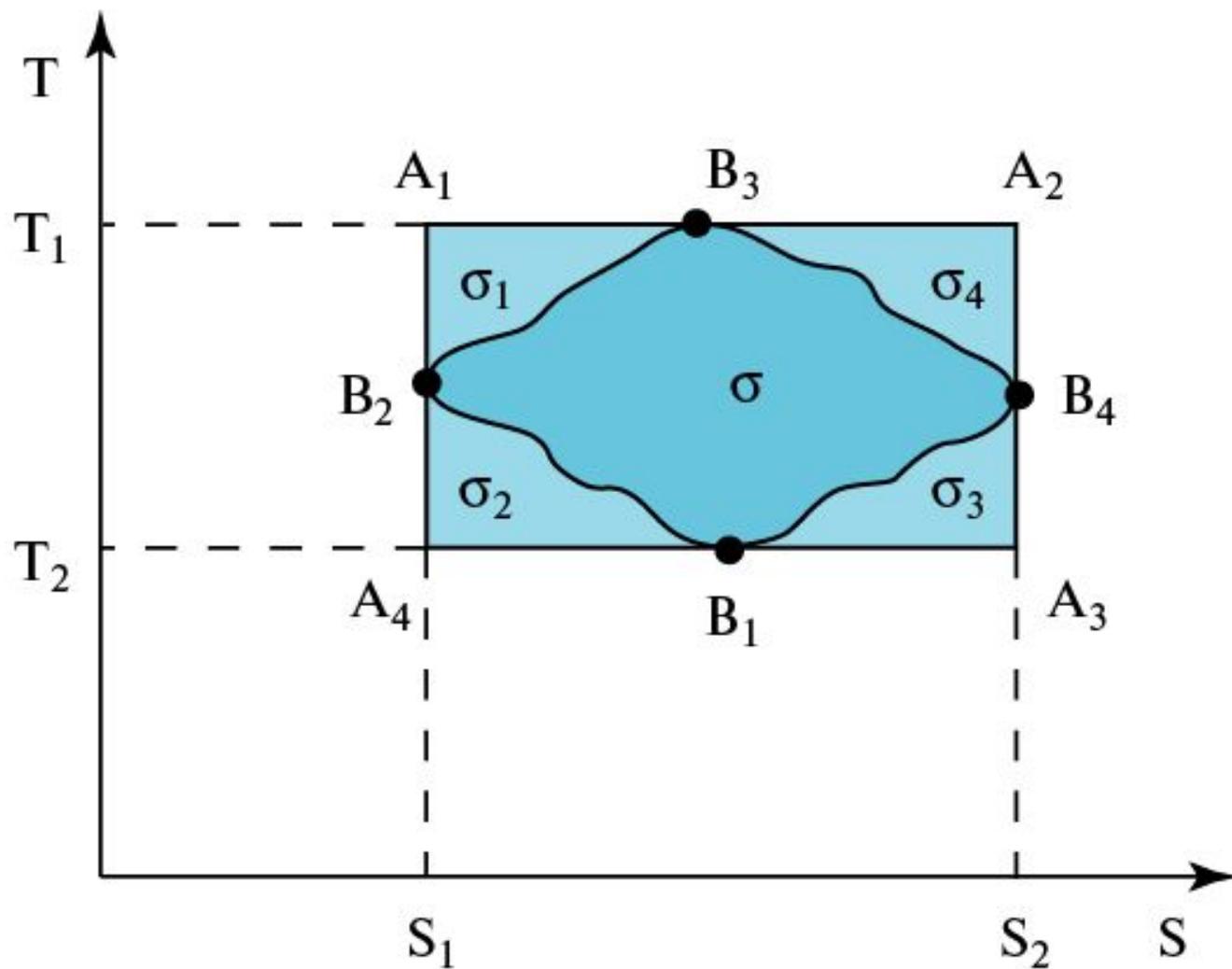
5. Циклы четырёхтактного двигателя, Дизеля, Стирлинга.

6. Демонстрации: Int2, Demo-NGU.

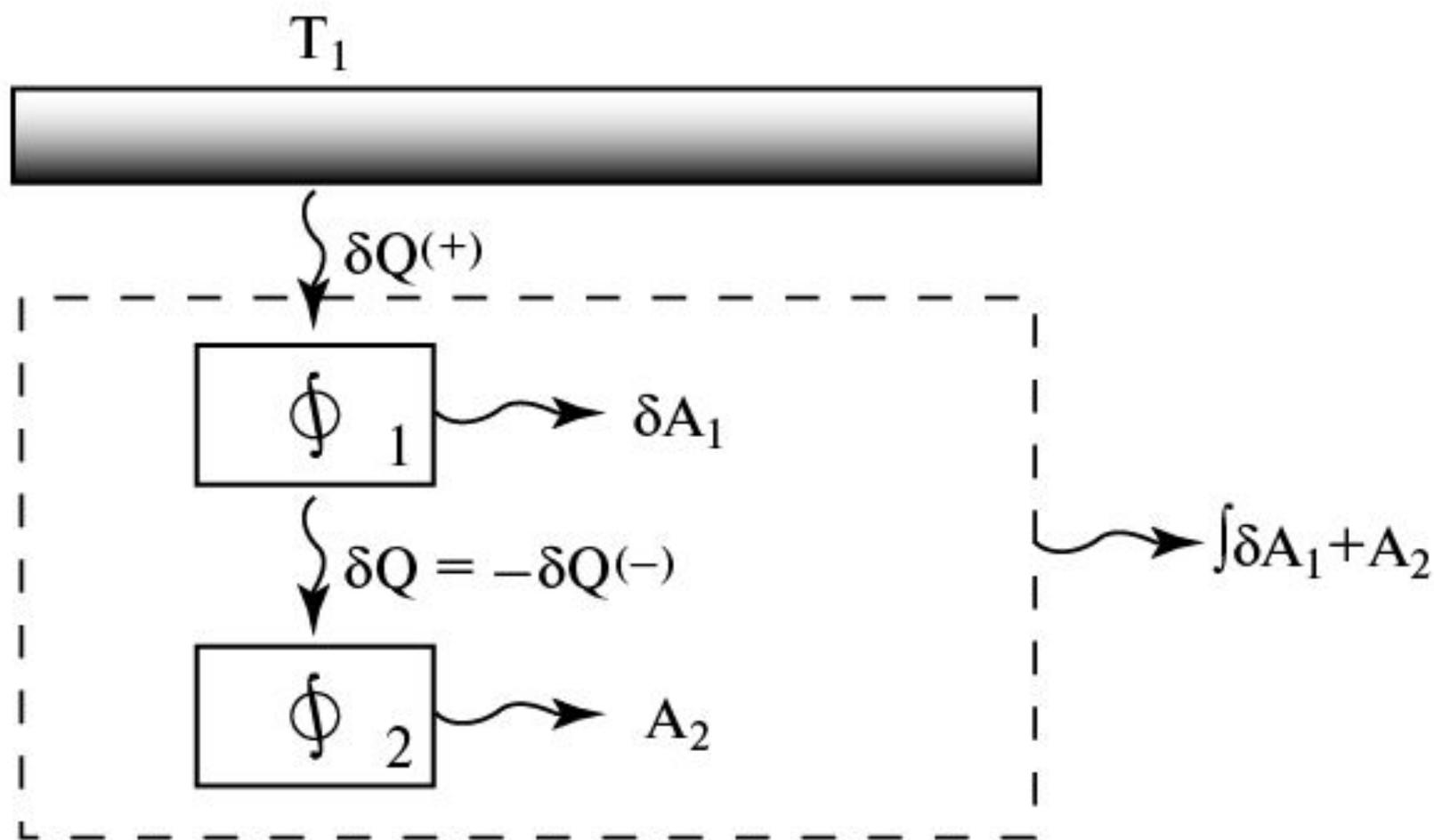
Схематическое доказательство эквивалентности формулировок второго начала термодинамики Кельвина и Клаузиуса



К доказательству теоремы о максимальной к. п. д. обратимого цикла Карно



К доказательству неравенства Клаузиуса для произвольного цикла



К модели цикла Карно

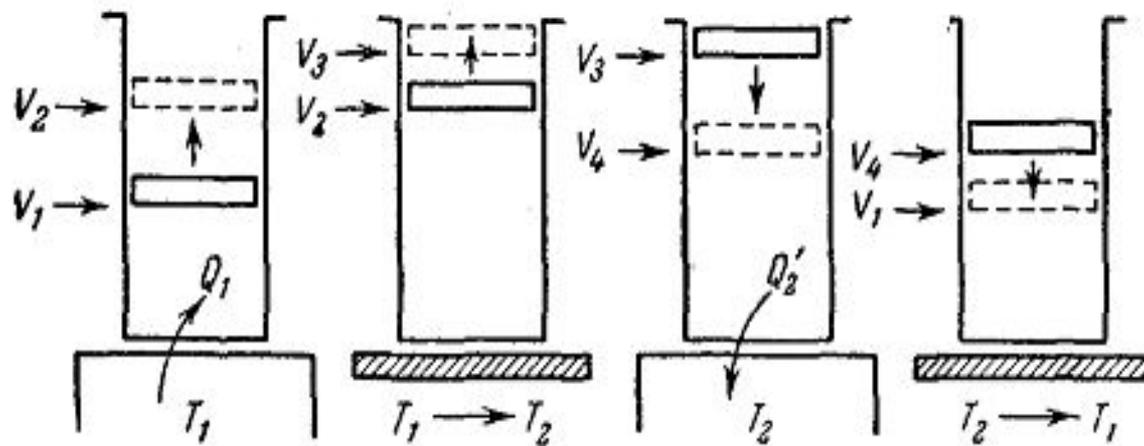
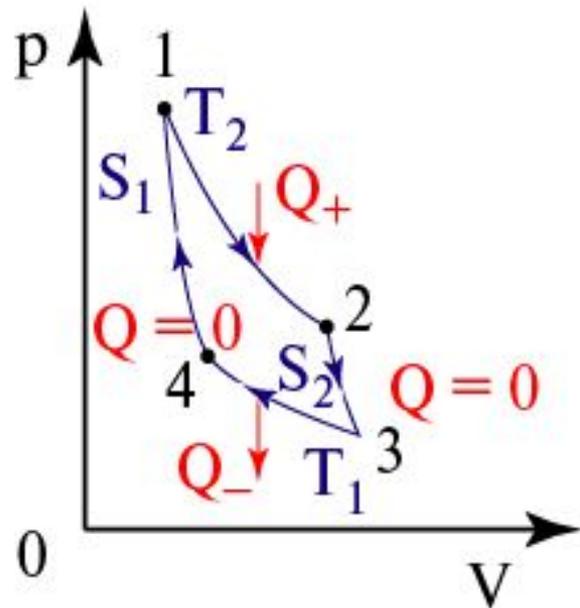


Рис. 288.

Цикл Карно

$$T_2 > T_1$$



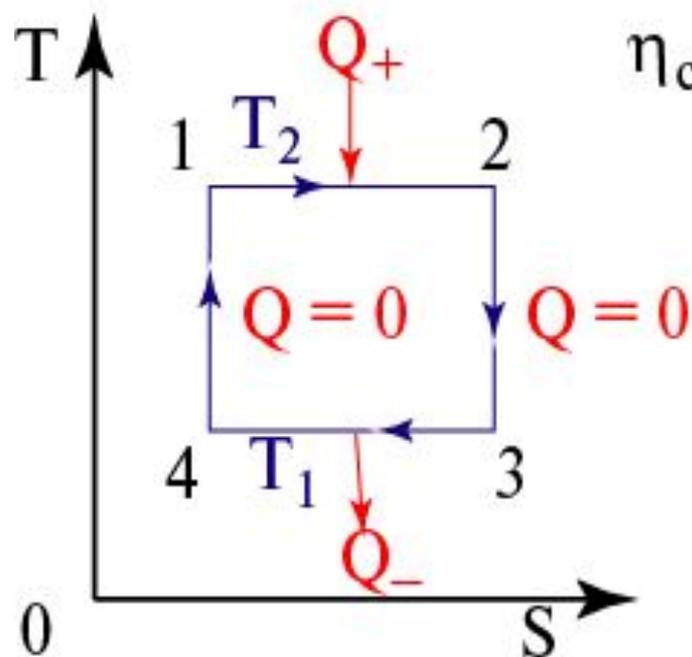
$$\eta_c = 1 - \frac{\nu RT_1 \ln(V_3 / V_4)}{\nu RT_2 \ln(V_2 / V_1)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} .$$

$$\begin{cases} p_1 V_1^\gamma = p_4 V_4^\gamma , \\ p_3 V_3^\gamma = p_2 V_2^\gamma , \\ p_2 V_2^\gamma = p_1 V_1^\gamma , \\ p_4 V_4^\gamma = p_3 V_3^\gamma . \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} = p_1 p_2 p_3 p_4 V_2 V_4 (V_1 V_3)^\gamma \\ = p_1 p_2 p_3 p_4 V_1 V_3 (V_2 V_4)^\gamma \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_2 V_4 (V_1 V_3)^\gamma = V_1 V_3 (V_2 V_4)^\gamma \Rightarrow (V_1 V_3)^{\gamma-1} = (V_2 V_4)^{\gamma-1} \Rightarrow$$

$$(V_1 V_3) = (V_2 V_4) .$$

Цикл Карно

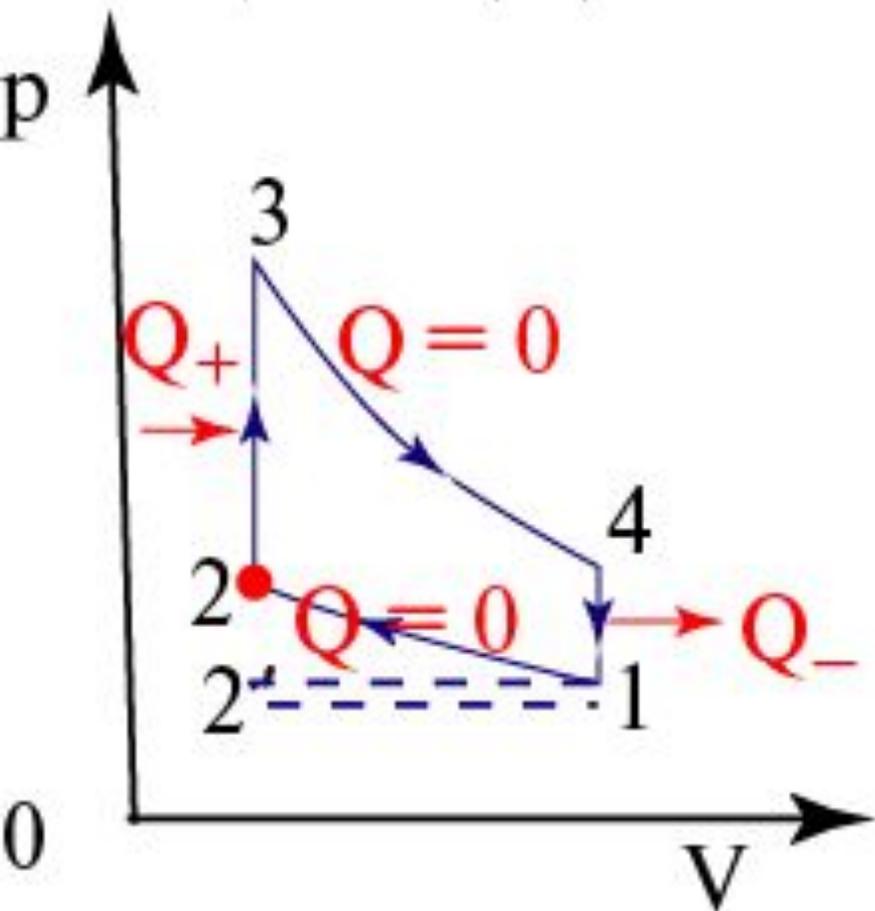


$$\eta_c = 1 - \frac{Q_-}{Q_+} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \frac{S_3 - S_4}{S_2 - S_1} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

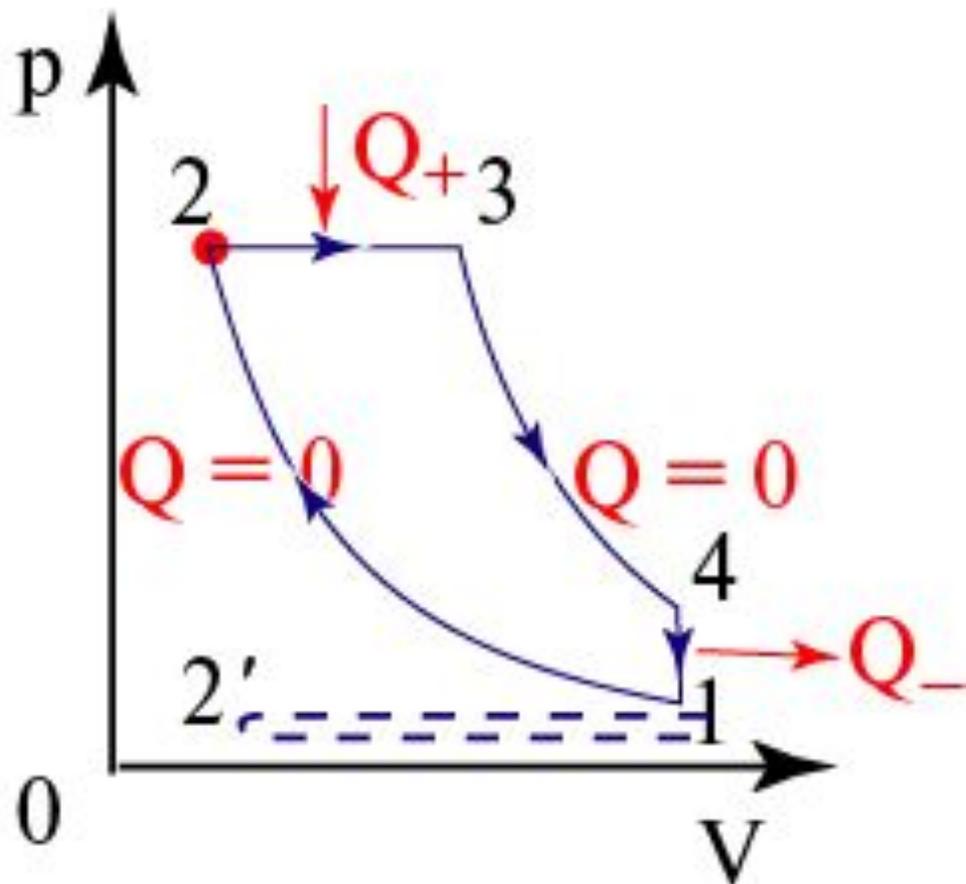
$$Q_+ = \int_1^2 T_2 dS = T_2 (S_2 - S_1),$$

$$Q_- = \int_3^4 T_1 dS = T_1 (S_3 - S_4).$$

Цикл ДВС

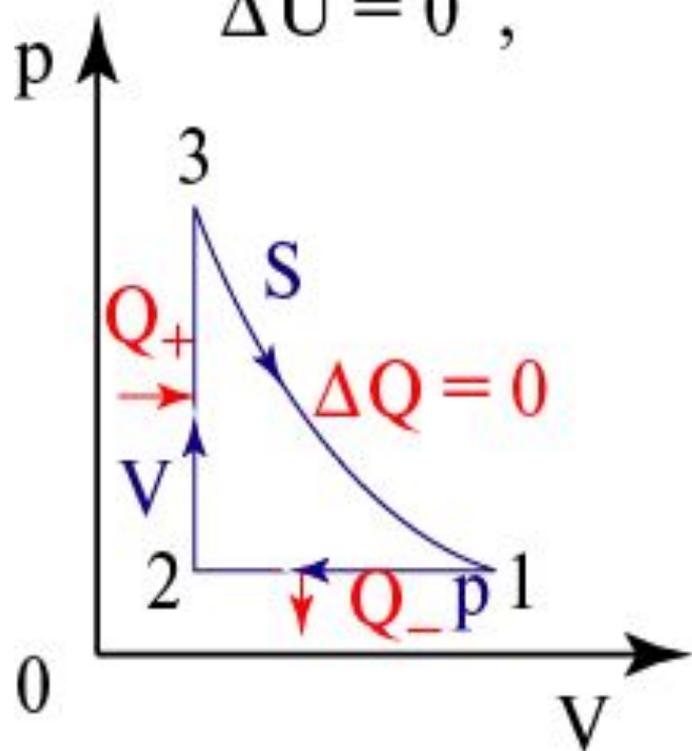


Цикл Дизеля



К. п. д. циклических процессов

$$\Delta U = 0, \quad (p_U, V_U, T_U) = (p_K, V_K, T_K) .$$



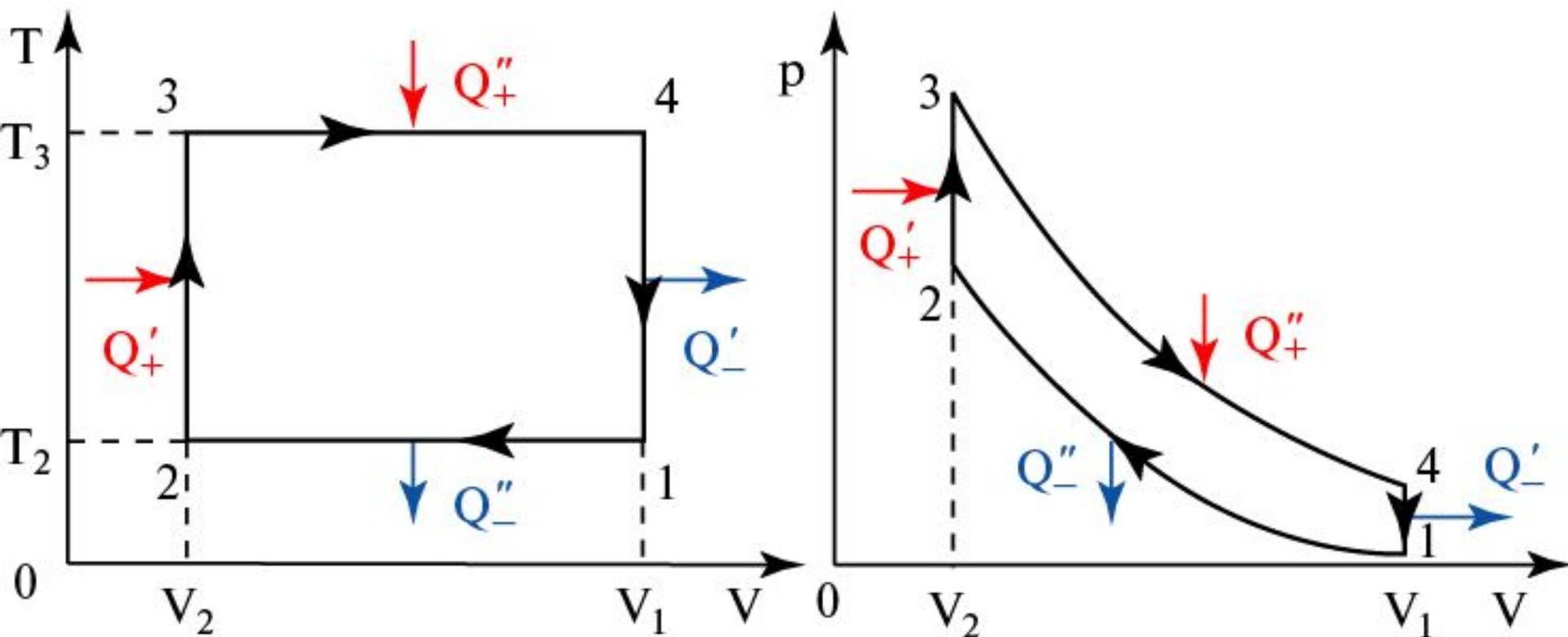
$$\eta = \frac{A_\sigma}{Q_+} = \frac{Q_+ - Q_-}{Q_+} = 1 - \frac{Q_-}{Q_+} .$$

$$\eta_{\text{DBC}} = 1 - \frac{C_V(T_4 - T_1)}{C_V(T_3 - T_2)} ; \quad \eta_{\text{D}} = \dots = 1 - \frac{T_4 - T_1}{\gamma(T_3 - T_2)} .$$

$$\eta_{\text{DBC}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right) / \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right) = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - (V_2/V_1)^{\gamma-1}$$

$$\begin{cases} p_3 V_3^\gamma = p_4 V_4^\gamma , \\ V_1 = V_4 , \\ p_2 V_2^\gamma = p_1 V_1^\gamma , \\ V_3 = V_2 . \end{cases} \Rightarrow \frac{p_4}{p_1} \left(\frac{V_4}{V_1} \right)^\gamma = \frac{p_3}{p_2} \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^\gamma \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} .$$

Цикл Клапейрона (Двигатель Стирлинга)



$$\eta = \frac{\ln n}{1/(\gamma - 1) - m/(m - 1) \ln n}$$

$$(n = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} ; m = \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3})$$

Кпд обратимых и необратимых циклических процессов

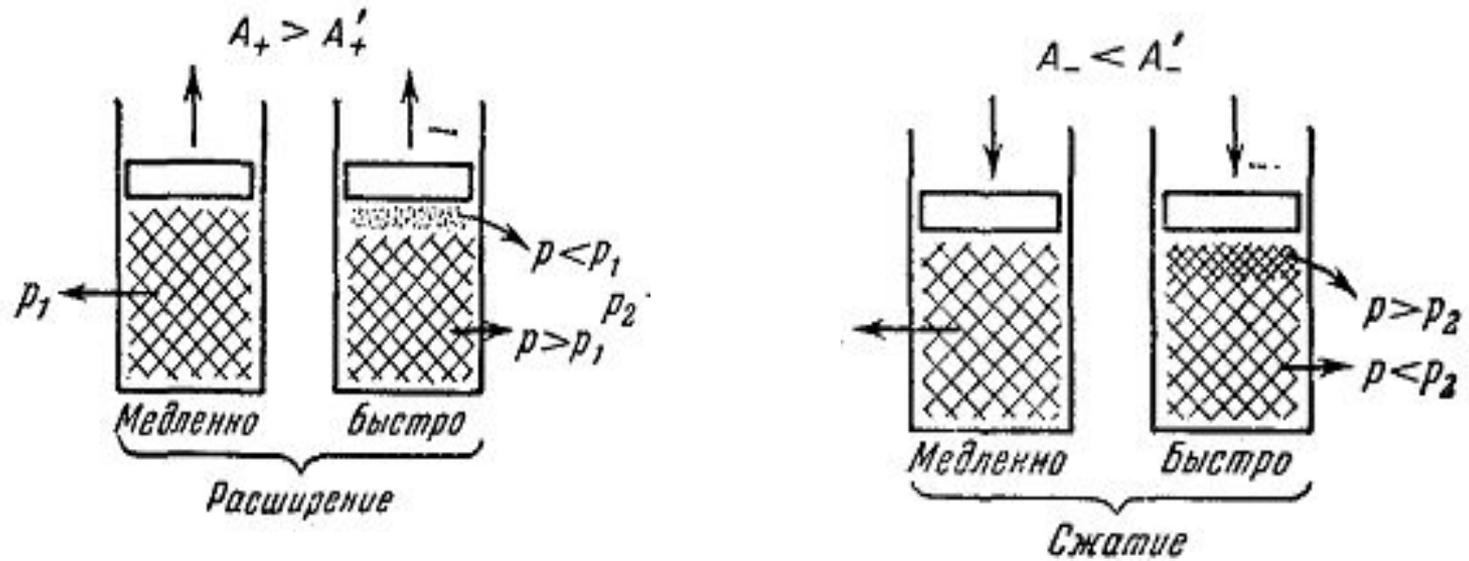


Рис. 292.

Термодинамическая шкала температур

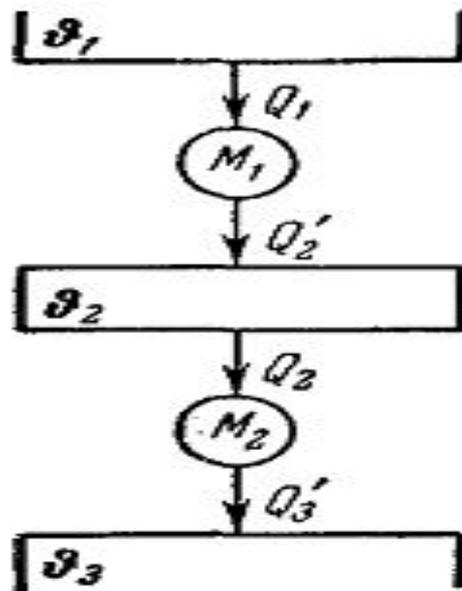


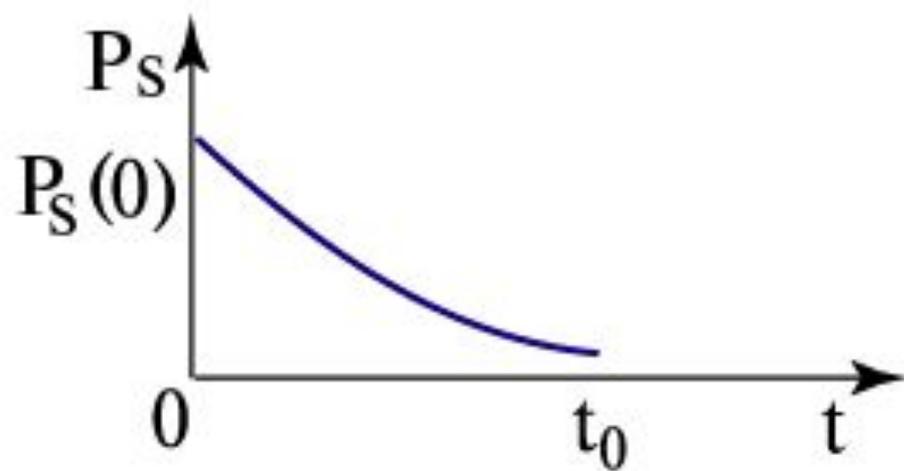
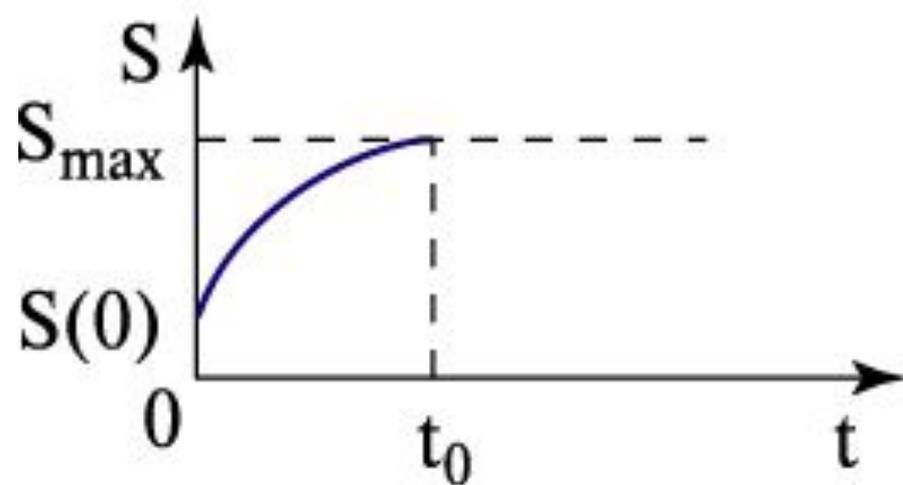
Рис. 294.

Лекция 11

1. Открытые системы. Принципы Пригожина для закрытых и открытых систем. Условия равновесия открытых систем. Четвертое начало термодинамики.
2. Динамический хаос.
3. Примеры процессов в открытых системах.
4. Фазовые состояния вещества. Динамическое равновесие.
5. Кристаллическое состояние вещества. Кристаллическая решетка. Физические типы кристаллических решёток. Теплоёмкость кристаллов. Закон Дюлонга и Пти.
6. Демонстрации: Int2.

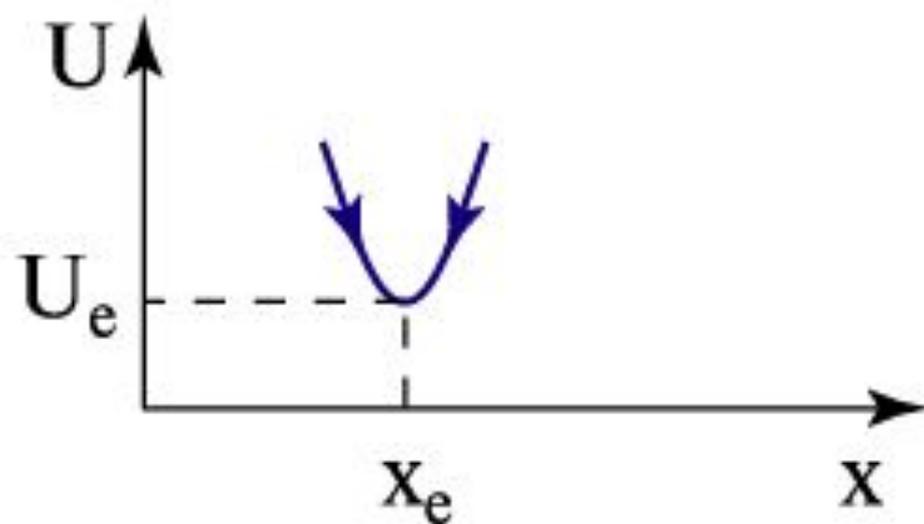
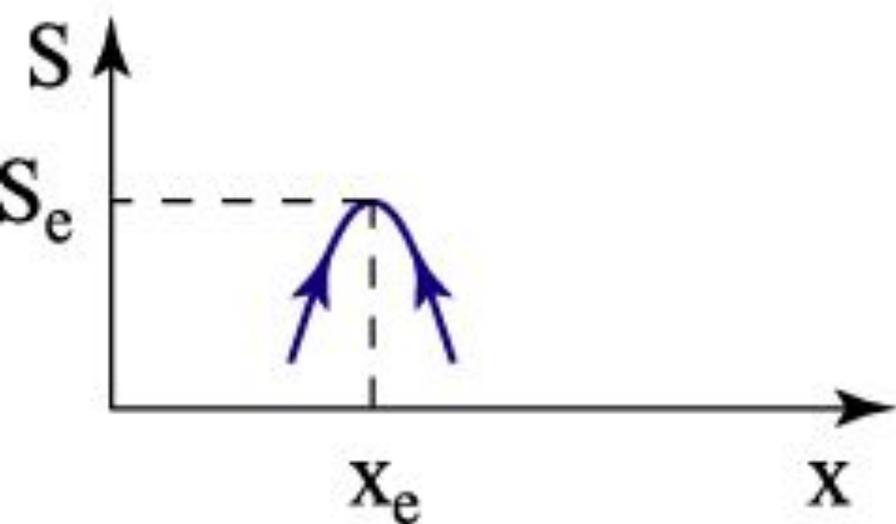
К четвертому началу термодинамики.

- 1) Принцип эволюции неравновесного состояния системы (Пригожин, 1945г.).



2) Условия равновесия замкнутой системы.

$$\begin{cases} S = S_{\max} = S_e = \text{const } t; \\ U = U_{\min} = U_e = \text{const } t; \\ V = V_e = \text{const } t. \end{cases} \quad \left(\frac{dP_s}{dt} = 0 \right);$$



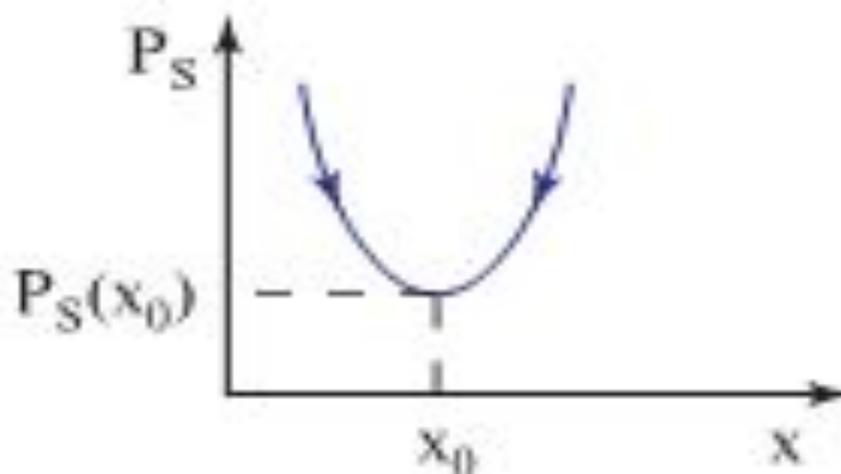
3) Критерий устойчивости закрытых систем.

$$S(x) \approx S(x_e) + \left. \frac{dS}{dx} \right|_{x=x_e} \delta x + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2S}{dx^2} \right|_{x=x_e} (\delta x)^2;$$

$$\left. \frac{dS}{dx} \right|_{x=x_e} = 0 \Rightarrow S(x) - S(x_e) < 0 \Rightarrow$$

$$\left. \frac{d^2S}{dx^2} \right|_{x=x_e} < 0 \quad \text{и} \quad \left. \frac{d^2U}{dx^2} \right|_{x=x_e} > 0.$$

$$\left. \frac{dP_S}{dt} \right|_{x=x_0} = 0$$



⑤ Энтропостат — $S(t) = \text{const}$.

Диссипативная система — $P_{S_i} > 0$.

⑥ Эволюция диссипативных систем .

$$P_S = P_{S_e} + P_{S_i} ;$$

P_{S_e} — поток энтропии ;

P_{S_i} — производство энтропии системой ;

а) Стационарные системы :

$$\frac{dS}{dt} = 0 ; \quad P_S = 0 \quad \Rightarrow \quad P_{S_e} = -P_{S_i} < 0 .$$

б) Нестационарные системы (неустойчивые состояния):

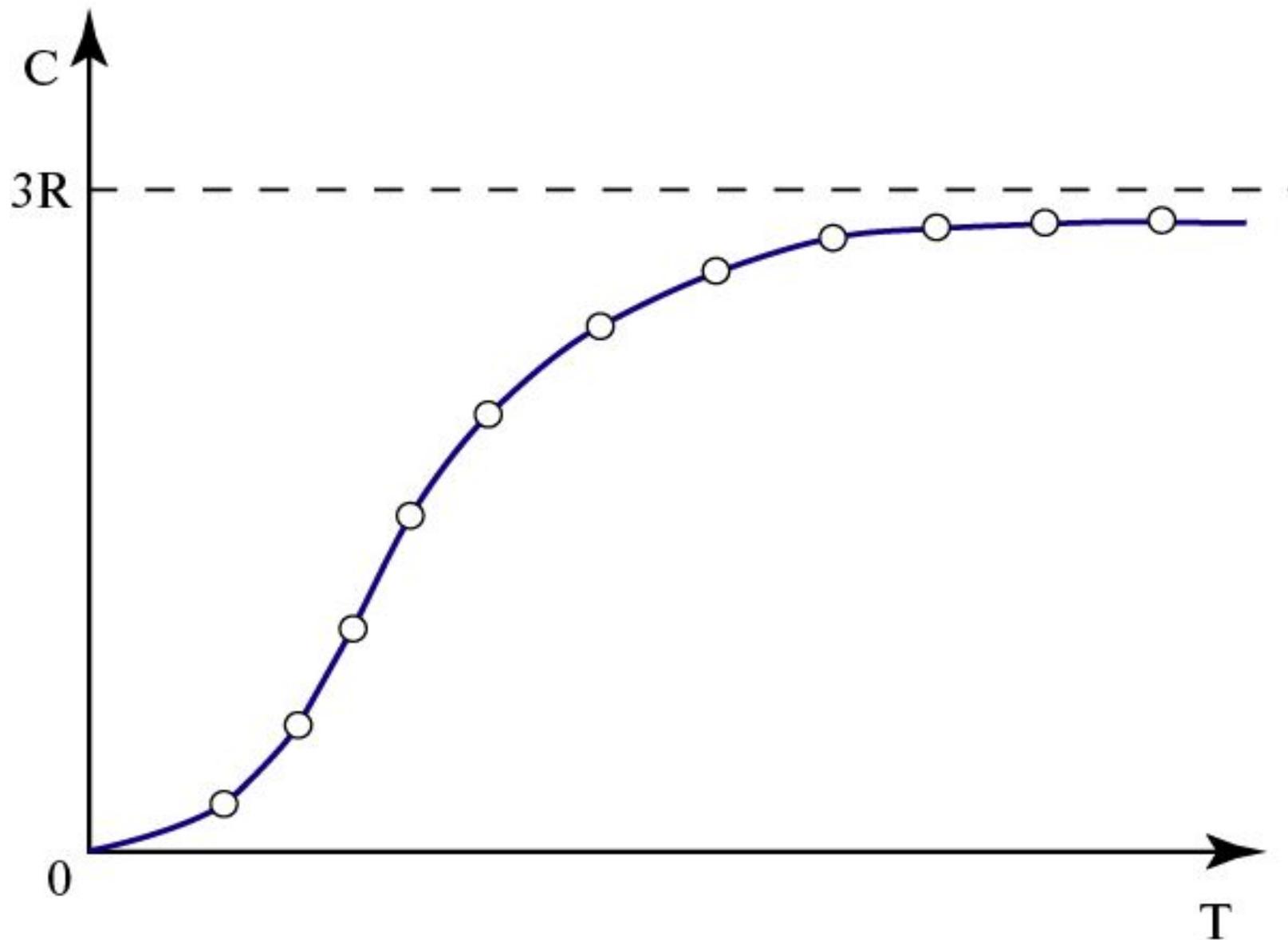
$$\begin{array}{c}
 P_{S_i} \uparrow \\
 P_{S_e} \downarrow
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \uparrow \\
 \downarrow
 \end{array}
 \frac{dS}{dt} \Rightarrow \frac{dS}{dt} > 0 \quad (P_{S_e} < 0, |P_{S_e}| < P_{S_i} > 0);$$

$$\begin{array}{c}
 P_{S_i} \uparrow \\
 P_{S_e} \downarrow
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \downarrow \\
 \uparrow
 \end{array}
 \frac{dS}{dt} \Rightarrow \frac{dS}{dt} < 0 \quad (P_{S_e} < 0, |P_{S_e}| > P_{S_i} > 0);$$

$$\begin{array}{c}
 P_{S_i} \uparrow \\
 P_{S_e} \uparrow
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \uparrow \\
 \uparrow
 \end{array}
 \frac{dS}{dt} \Rightarrow \frac{dS}{dt} > \max \{ P_{S_e}, P_{S_i} \} > 0 \quad (P_{S_e} > 0).$$

Для создания нового стационарного состояния требуется открытость системы.

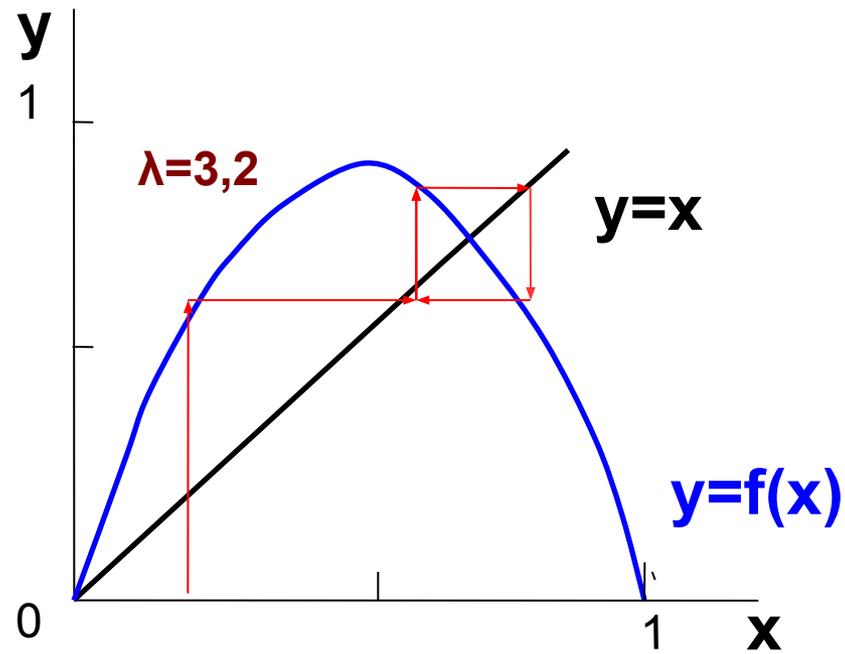
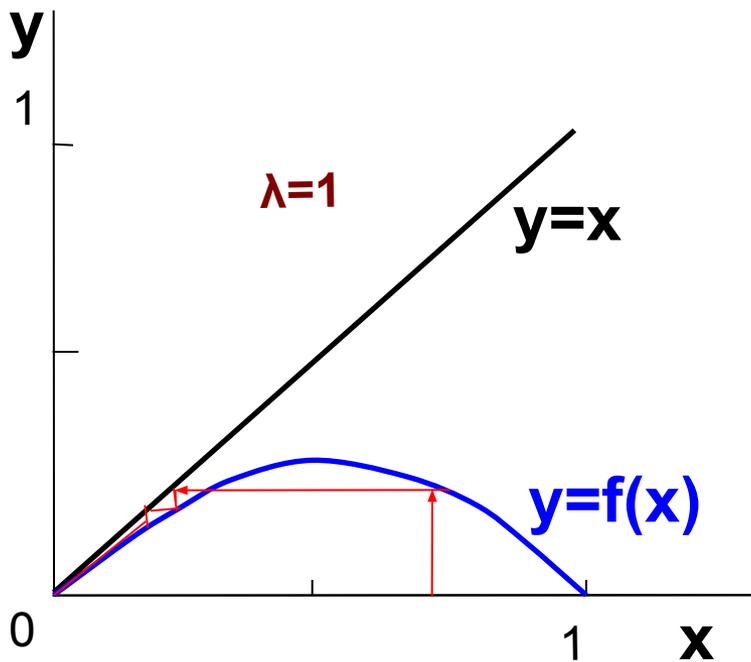
Теплоемкость твердых тел



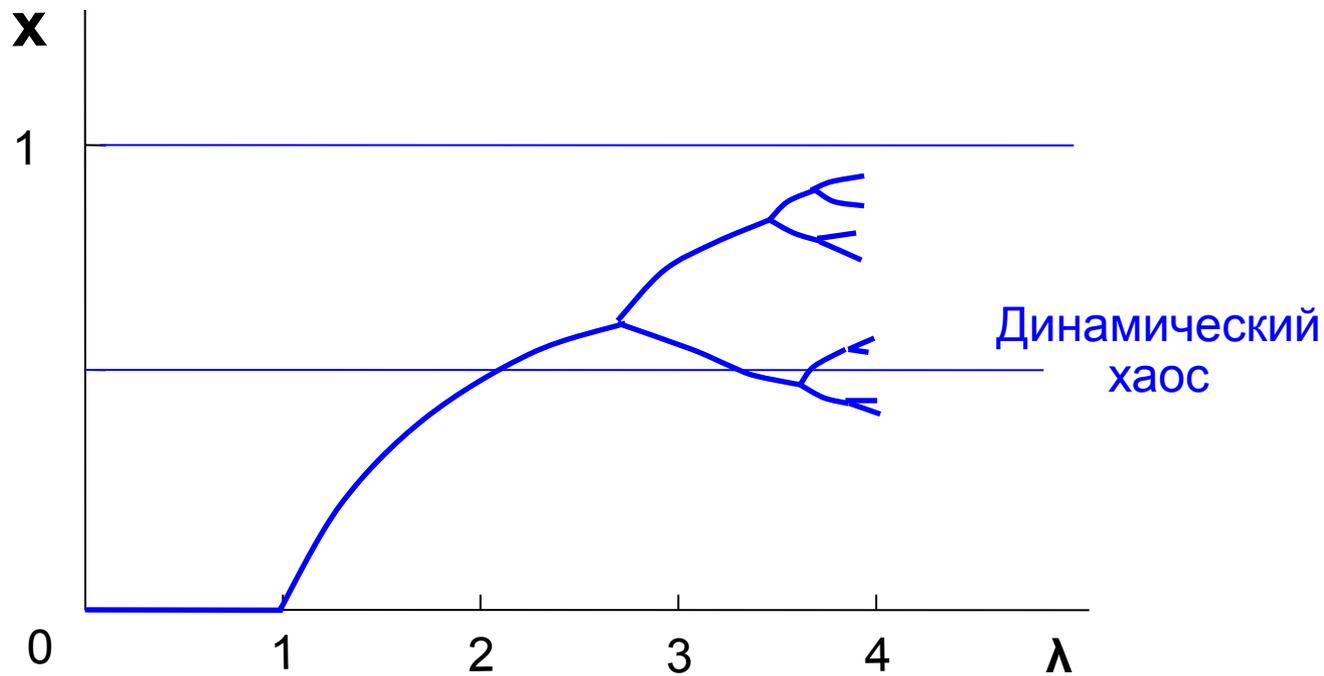
Порядок и хаос

$dN/dt = \beta N(1 - N/N_m)$ – непрерывное множество;
 $(N_{i+1} - N_i)/\tau = \beta N_i(1 - N_i/N_m)$ – дискретное множество;
 $x_{i+1} = (1 + \beta\tau)x_i - \beta\tau x_i^2$ (*), $x_i = N_i/N_m$.

- a) $\lambda \gg 1 \rightarrow x_{i+1} = \lambda x_i(1 - x_i) \equiv f(x)$;
b) $\lambda \ll 1 \rightarrow x_{i+1} \approx x_i \approx ?$;
c) $\lambda = 0 \rightarrow x_i = \text{const} = ?$;
 $\lambda = \beta\tau$.



Графическое
представление
решения
уравнения (*)



Лекция 12

1. Кристаллическая структура вещества.
2. Жидкое состояние вещества. Структура жидкостей.
3. Поверхностное натяжение. Свободная энергия. Капиллярное давление.
4. Явления на границе трех фаз вещества.
5. Формула Лапласа.
6. Смачивание. Капиллярные явления.
7. Демонстрации: Int2.

Кристаллическая ячейка

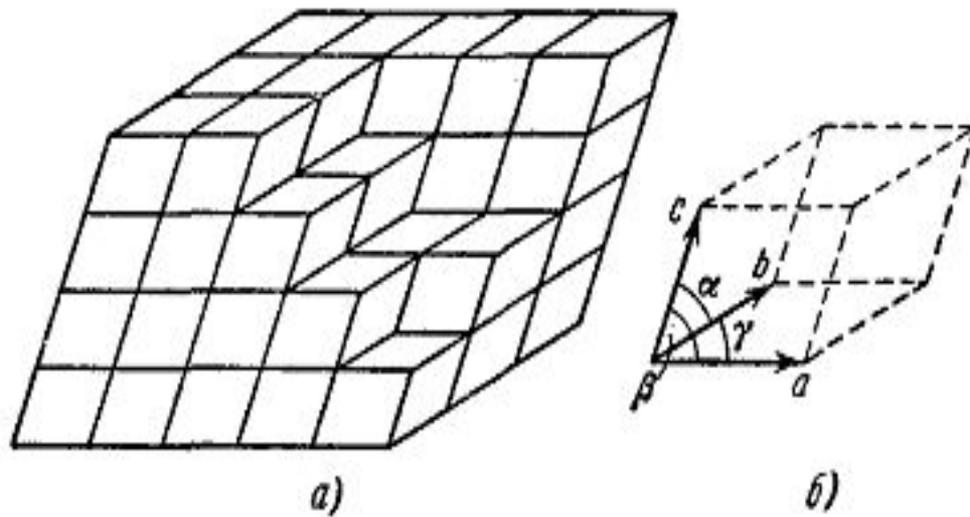
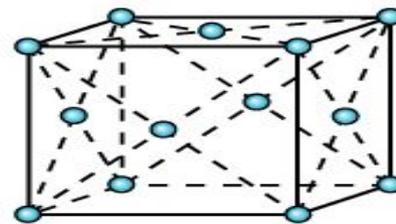
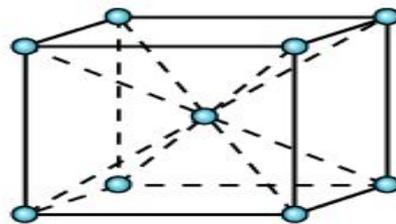
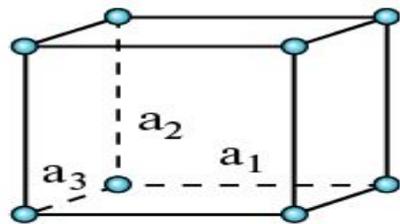


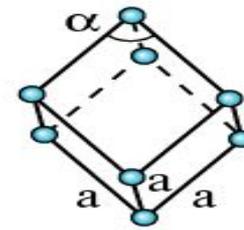
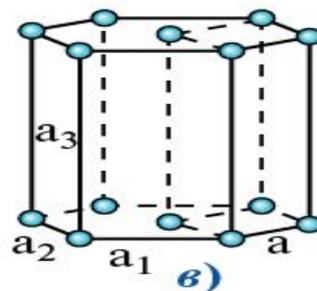
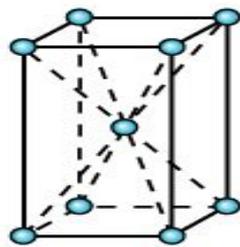
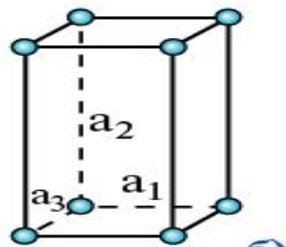
Рис. 303.

Кристаллические классы и типы решеток Системы:

a — кубическая, *b* — тетрагональная,
v — гексагональная, *г* — ромбоэдрическая,
д — ромбическая, *e* — моноклинная, *ж* — триклинная



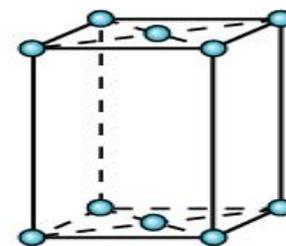
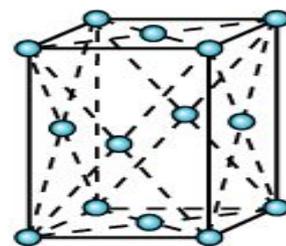
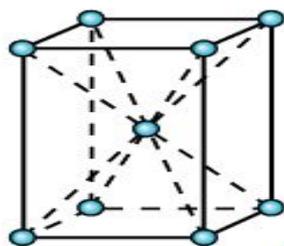
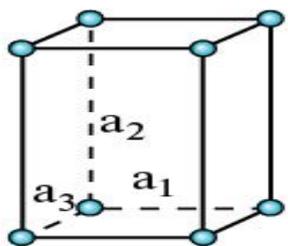
a)



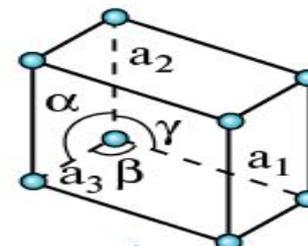
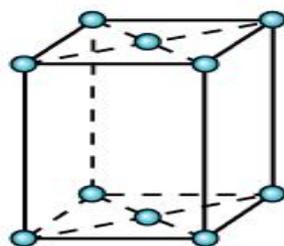
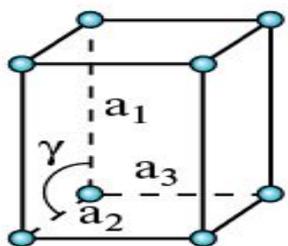
b)

v)

г)



e)



д)

ж)

Периодические структуры элементарных ячеек

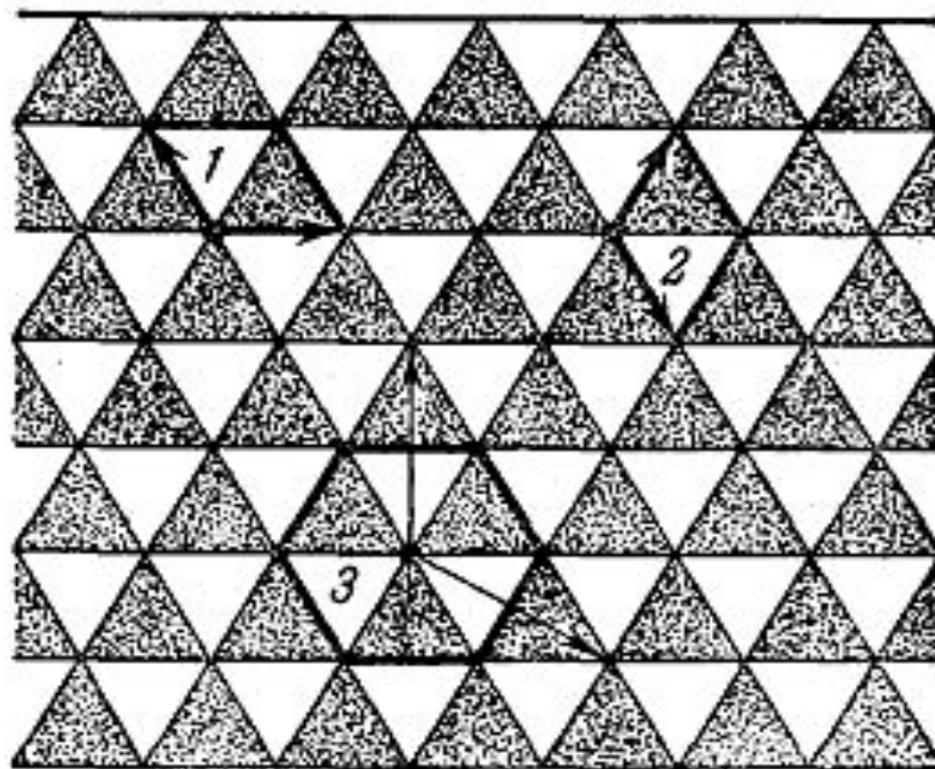


Рис. 304.

Плоскости симметрии

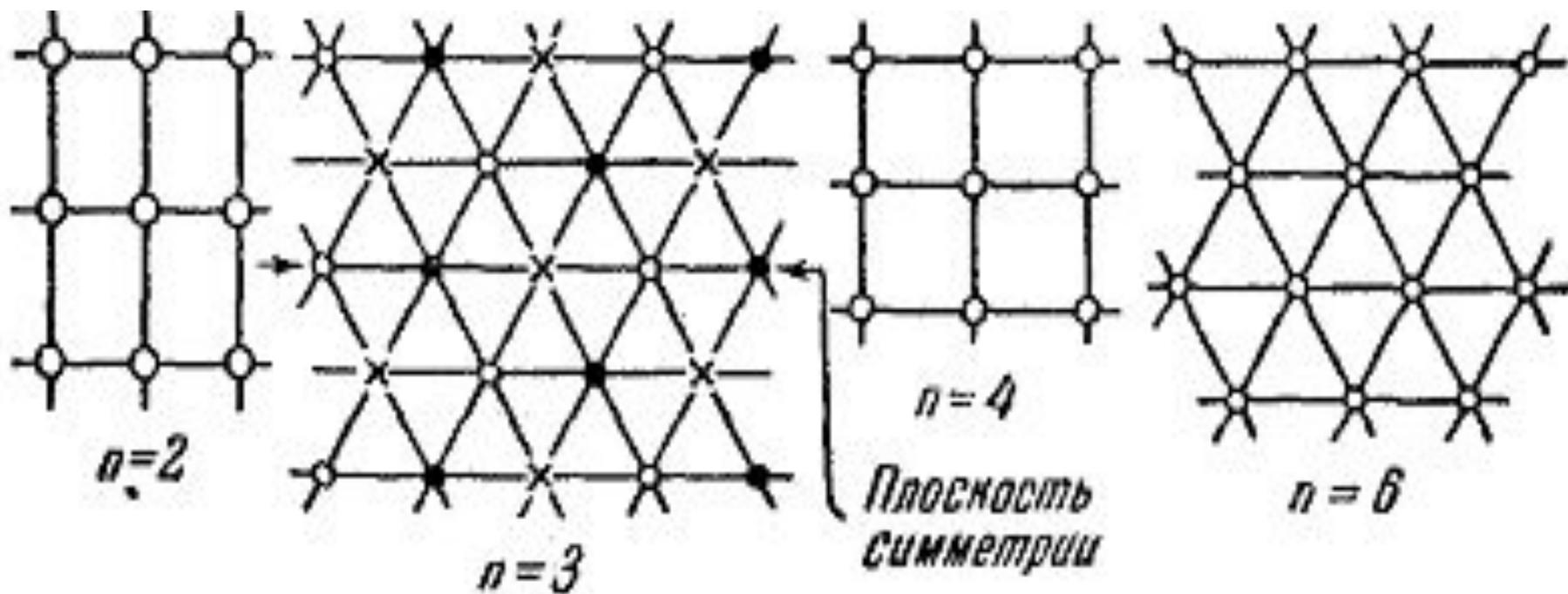


Рис. 305.

Гексагональная структура решетки

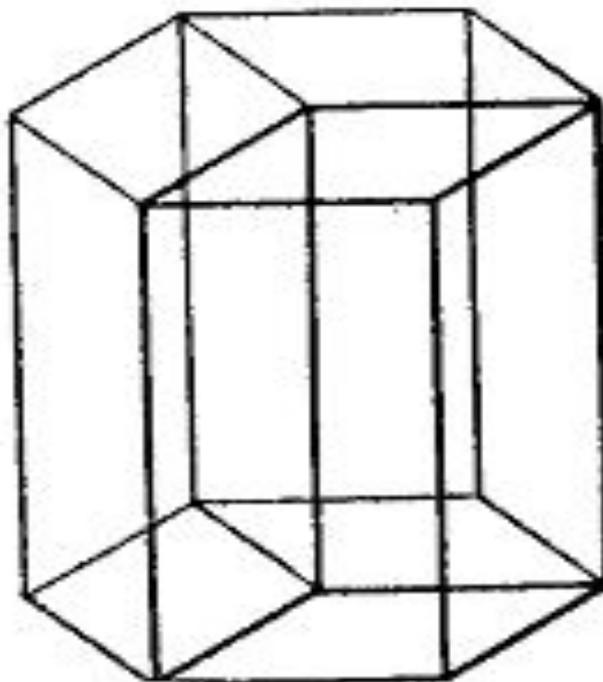


Рис. 306.

Решетка ионных кристаллов

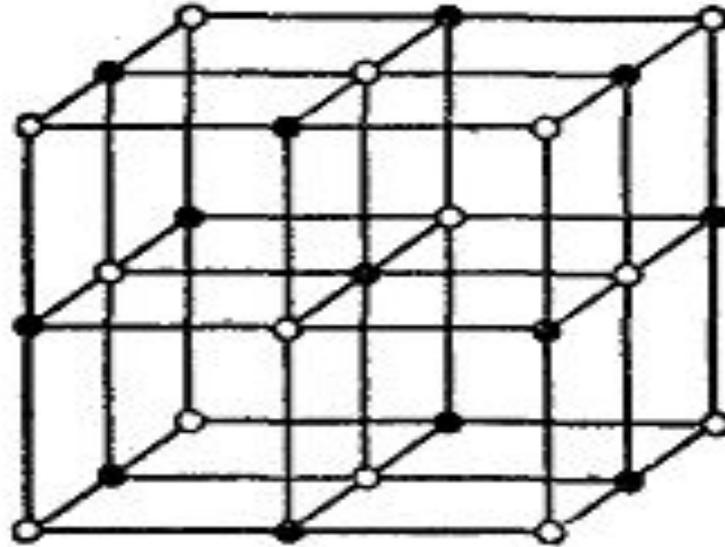


Рис. 307.

Решетки алмаза (а) и графита (б)

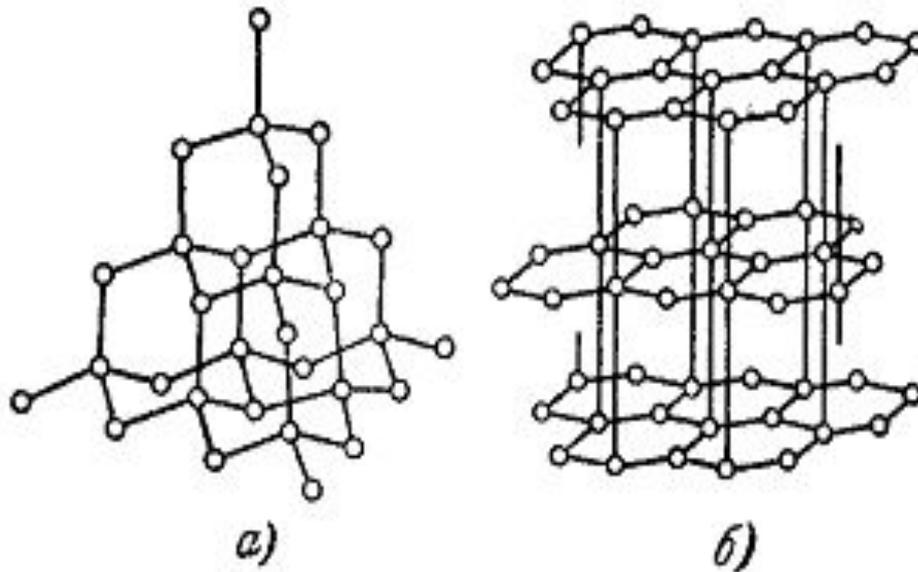
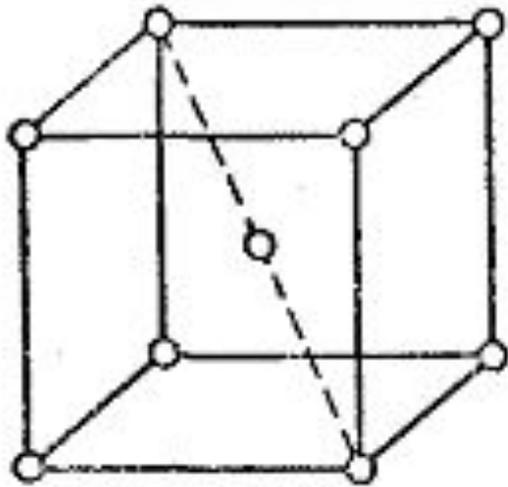


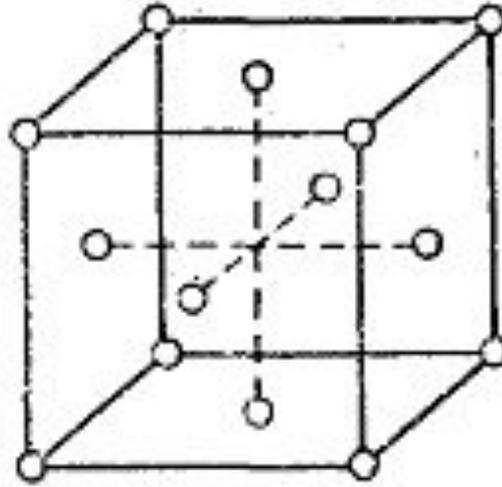
Рис. 308.

Кристаллические решетки металлов

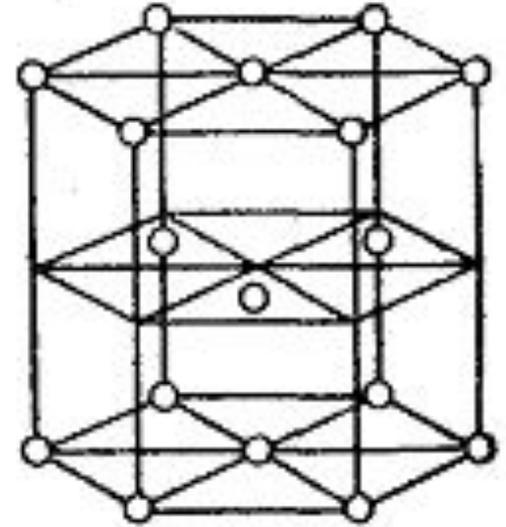
(объемноцентрированная - а,
гранецентрированная - б, гексагональная - в)



а)



б)



в)

Рис. 309.

Зависимость температуры твердого тела от времени при плавлении

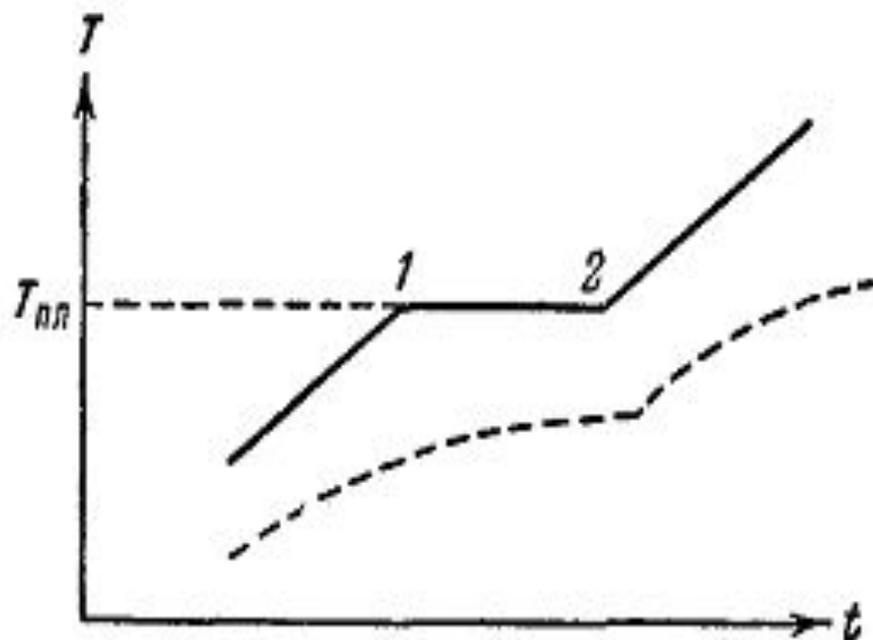


Рис. 328.

Переход твердого тела из твердой в жидкую фазу на (P*V*) диаграмме

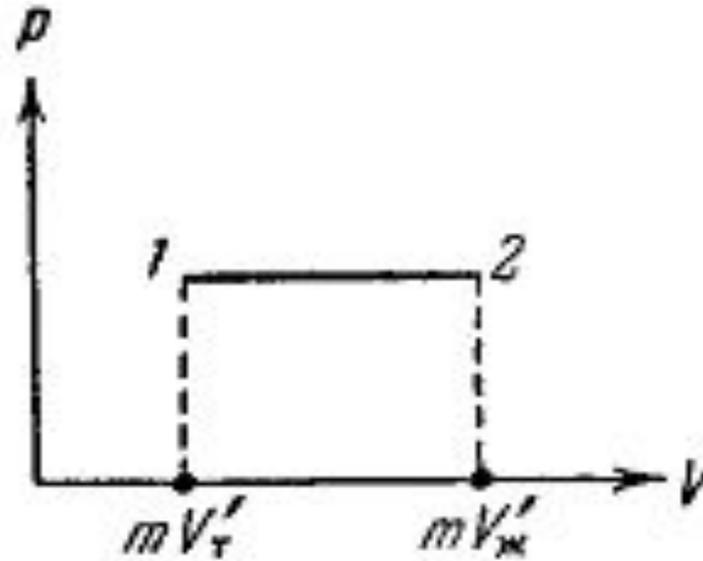
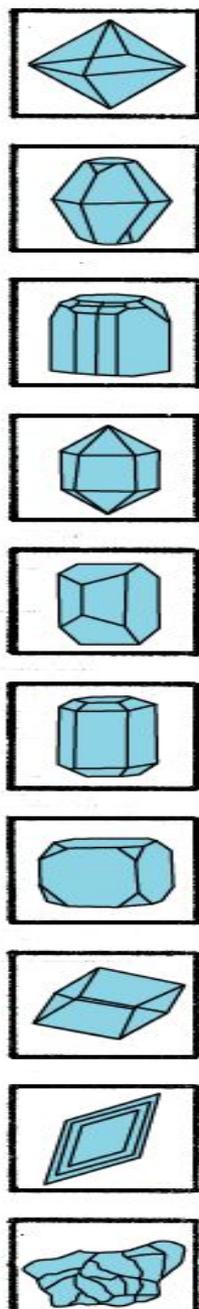
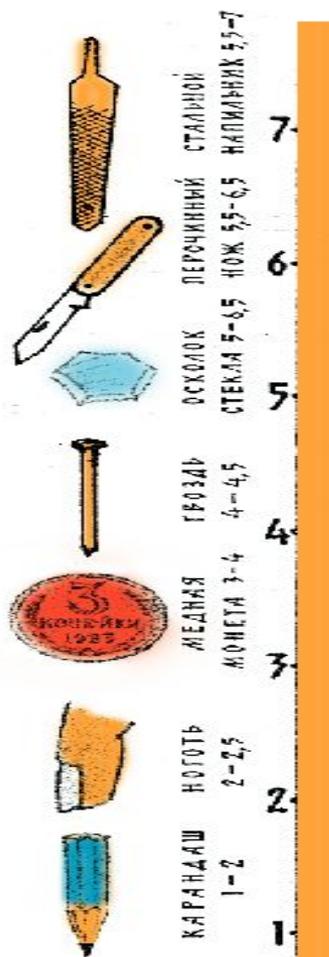
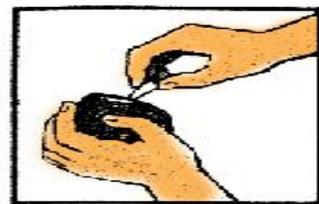


Рис. 329.

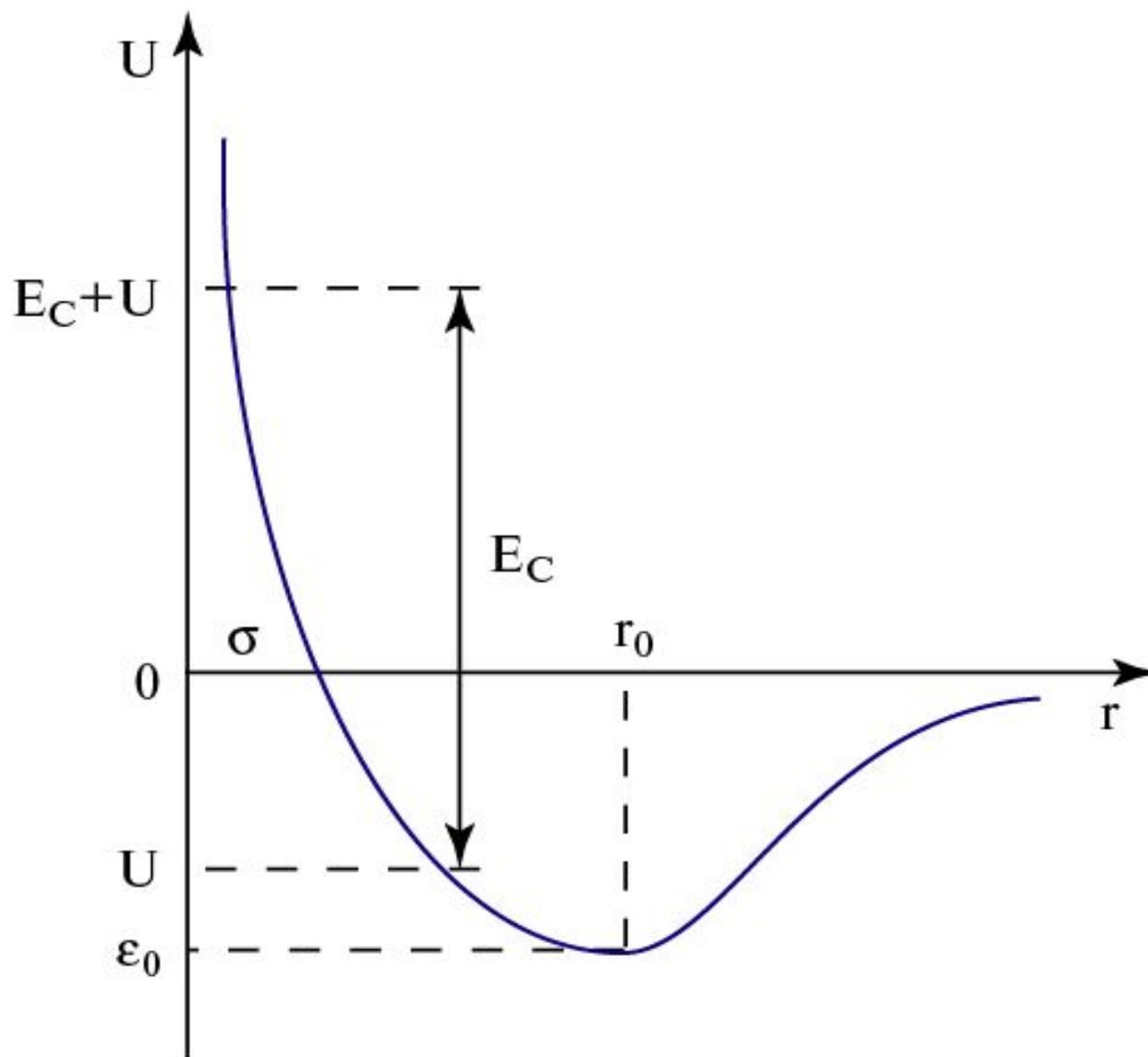
Относительная твердость (по шкале Мооса).



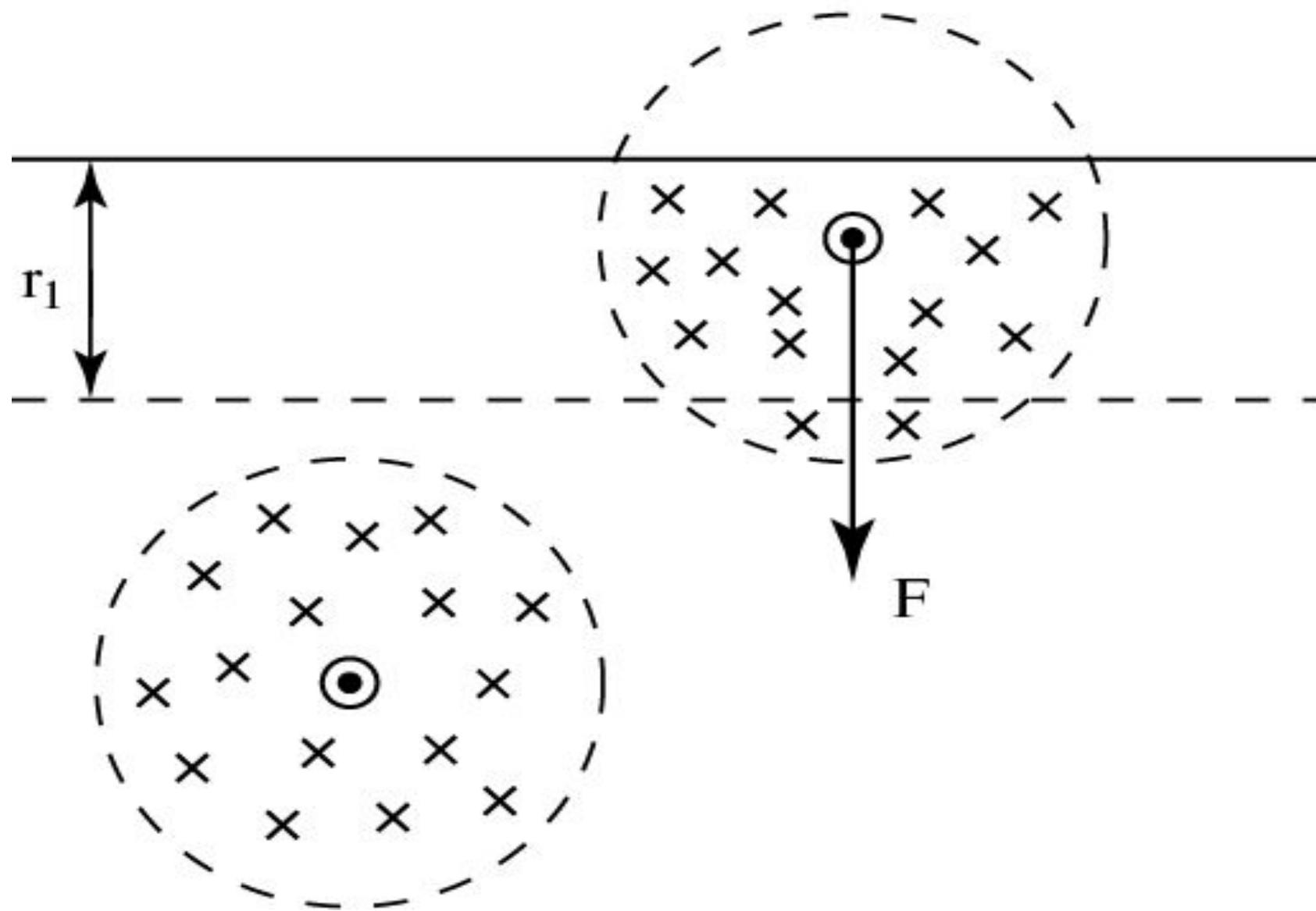
ШКАЛА МОССА

10	АЛМАЗ	БОРАЗОН	
9	КОРУНД	РУБИН	
		ХРИЗОБЕРИЛ 8,5	
8	ТОПАЗ		
		БЕРИЛЛ 7,5-8	
		ЦИРКОН 7-8	
		ТУРМАЛИН 7-7,5	
7	КВАРЦ	КРЕМЕНИЙ	
		ГРАНАТ 6,5-7,5	
		ЯШМА, ХАЛЦЕДОН 6,5-7	
		ПОЛЕВОЙ ШПАТ, АГАТ 6-6,5	
6	ОРТОКЛАЗ		
		СТЕКЛО 5-6,5	
		ЛАЗУРИТ 5,5-6	
		ВИРЮЗА 5-6	
5	АПАТИТ		
		ПЛАТИНА 3,5-5,5	
		КЮРИТ 4-5	
		ТАГАРИНИТ 4-4,5	
4	ФЛЮОРИТ		
		МАЛАХИТ 3,5-4	
		СУРЬМА 3-3,5	
3	КАЛЬЦИТ	МРАМОР	
		МЕДЬ, СЕРЕБРО, ЗОЛОТО 2,5-3	
		СУРИК, МУСКОВИТ 2-3	
		ЯНТАРЬ, БУРА 2-2,5	
2	ГИПС		
		ГРАФИТ, НАШАТЫРЬ, СЕРА 1-2	
		СОДА, ВЕРМИКУЛИТ 1-1,5	
1	ТАЛЬК		

Потенциал межмолекулярного взаимодействия



Поверхностное натяжение



Поверхностное натяжение жидкости на границе с твердым телом

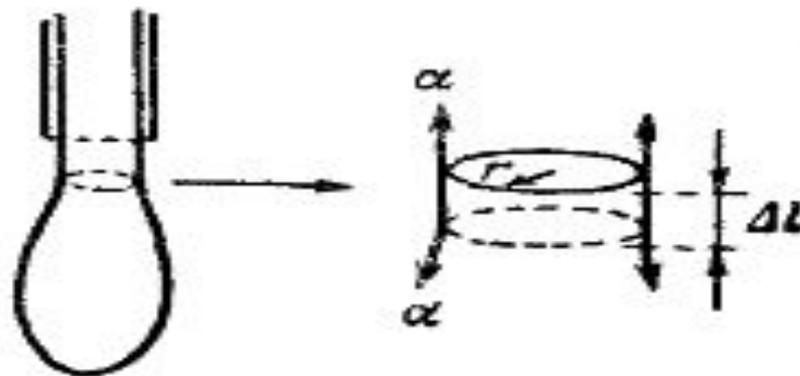
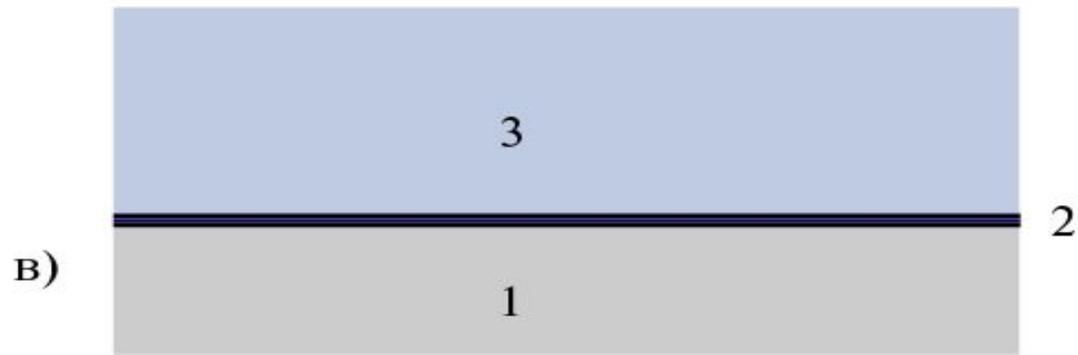
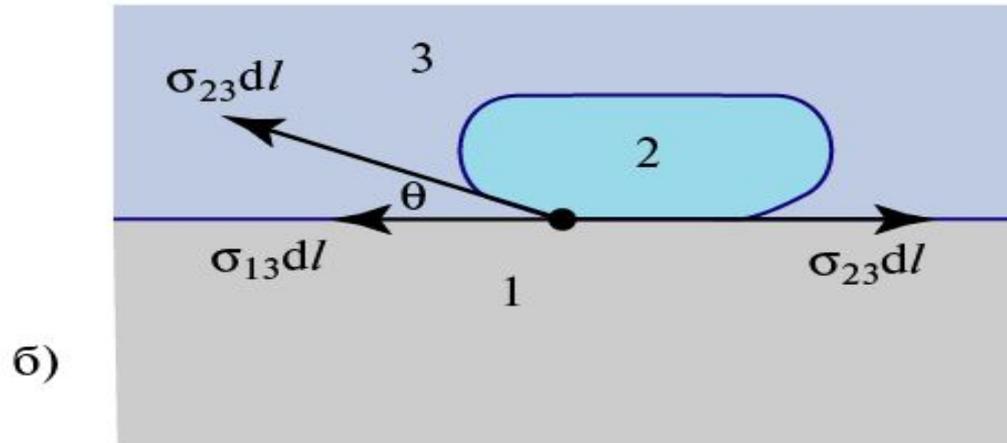
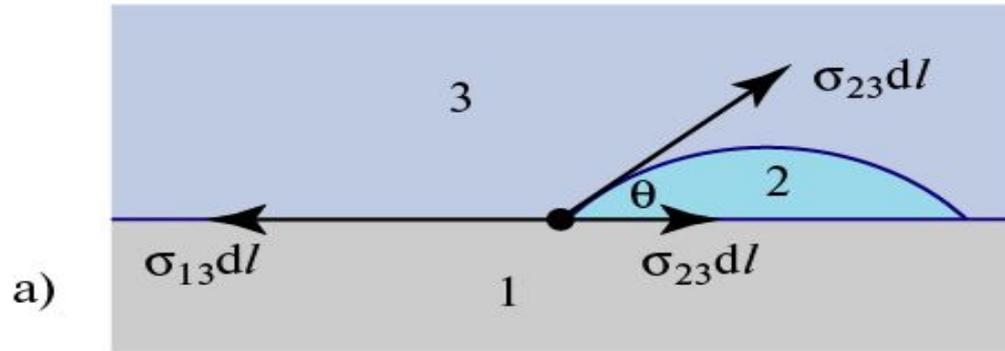


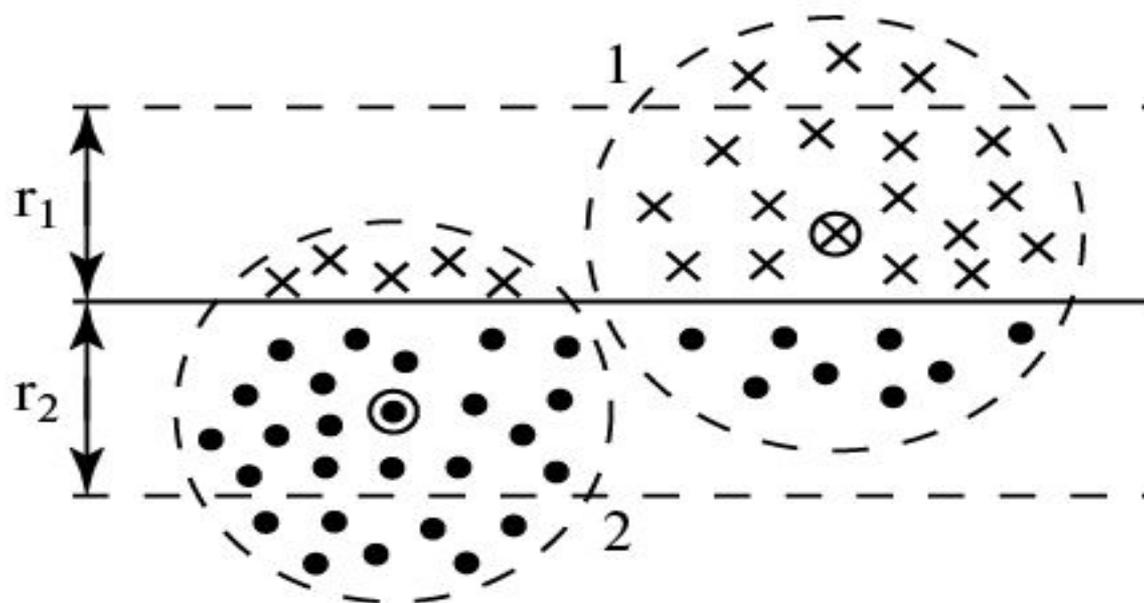
Рис. 313.

Условия равновесия на границе жидкости с твердым телом

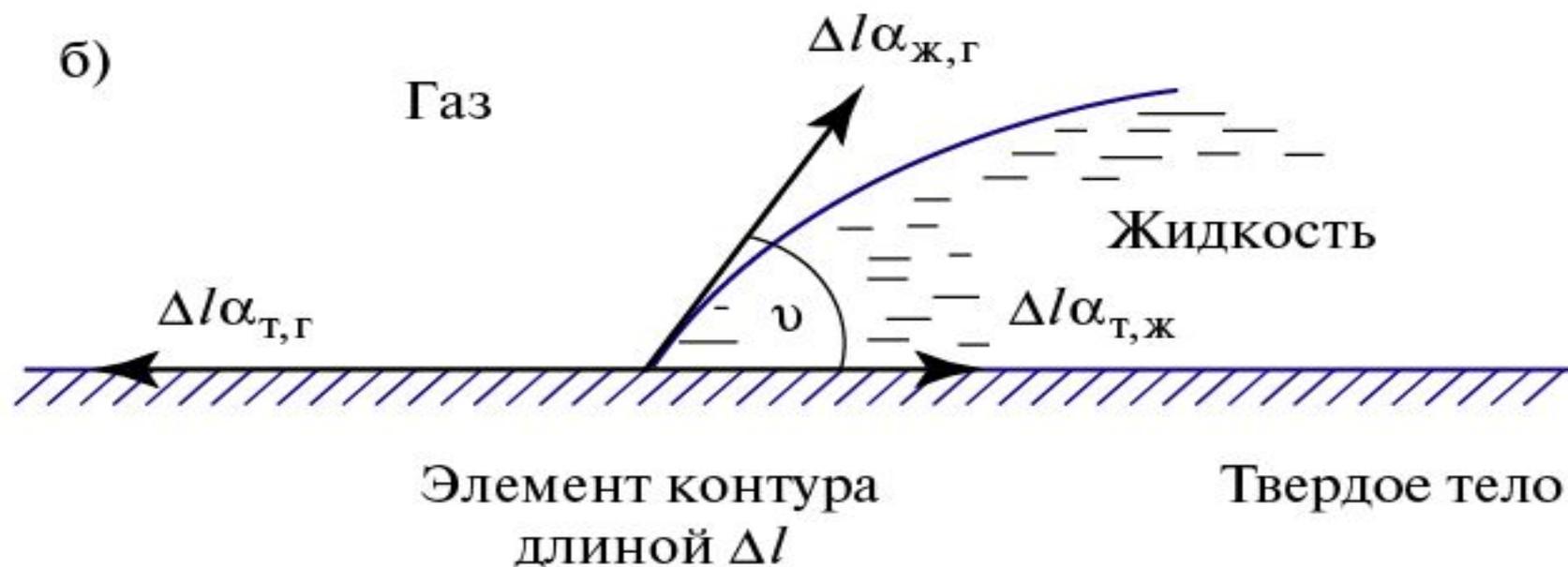


Явления на границе жидкость-твердое тело

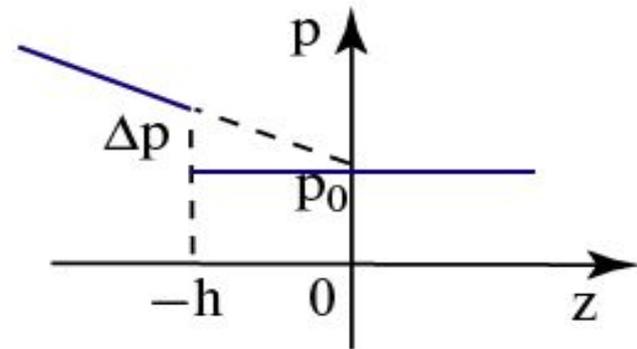
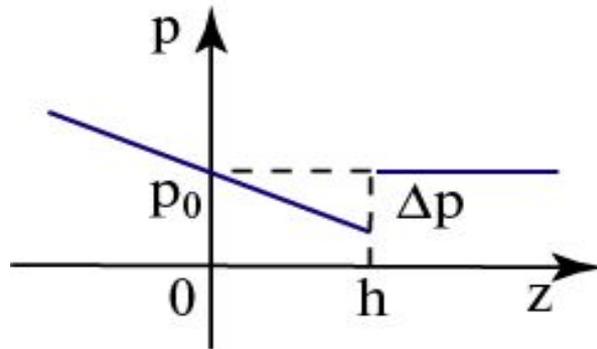
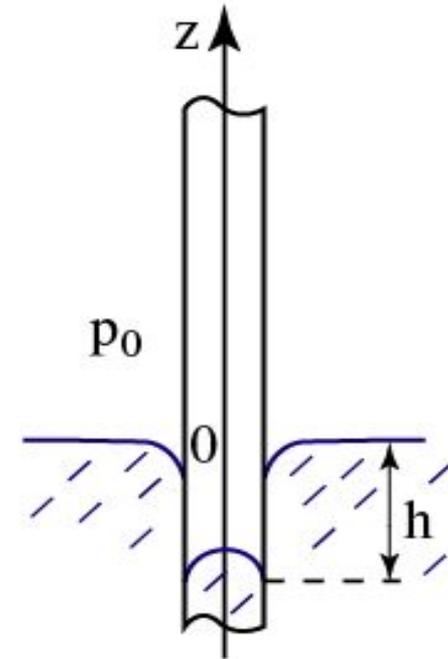
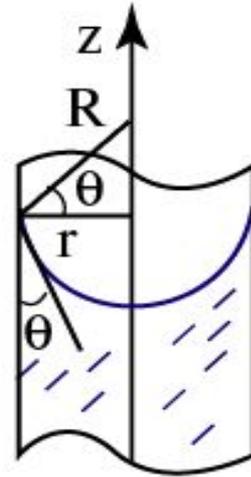
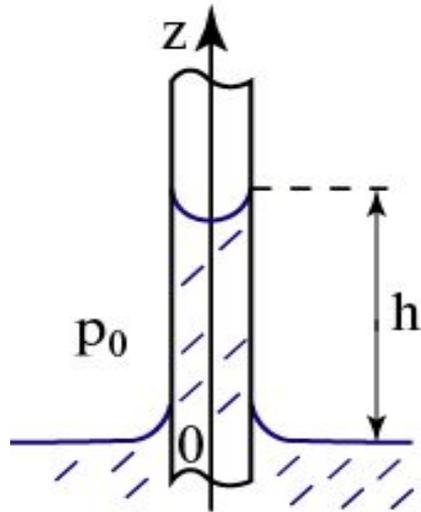
а)



б)



Капиллярное давление



$$h = \frac{2\alpha \cos\theta}{\rho g r}$$

Коэффициенты поверхностного натяжения

Т а б л и ц а 14

Вещество	α , н/м
Ртуть	0,490
Вода	0,073
Бензол	0,029
Спирт	0,023
Эфир	0,020

Добавочное давление

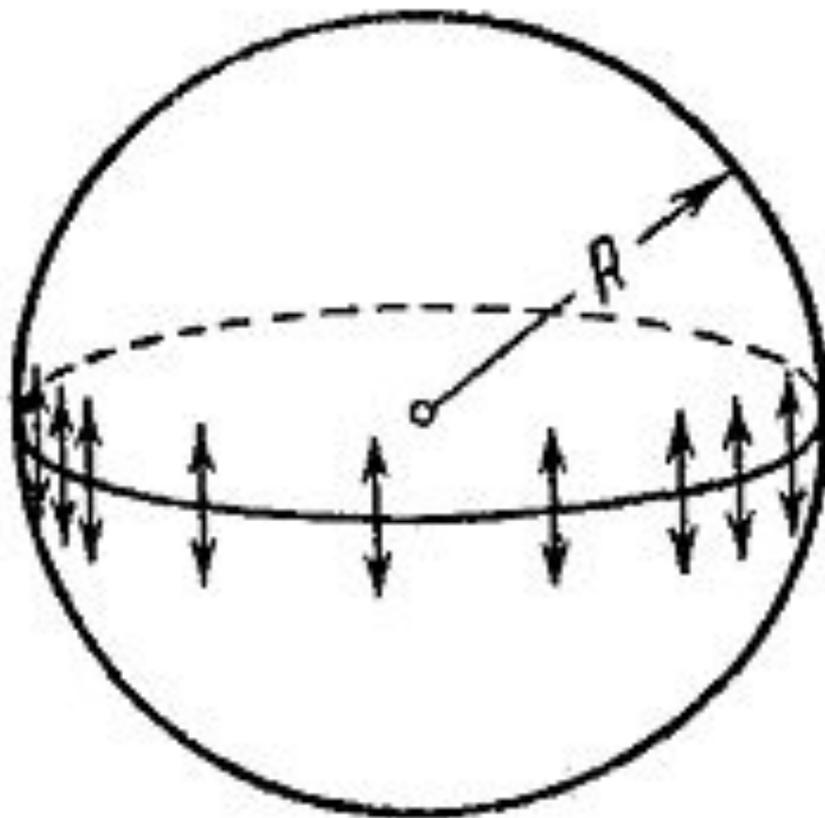


Рис. 315.

Радиусы кривизны в формуле Лапласа

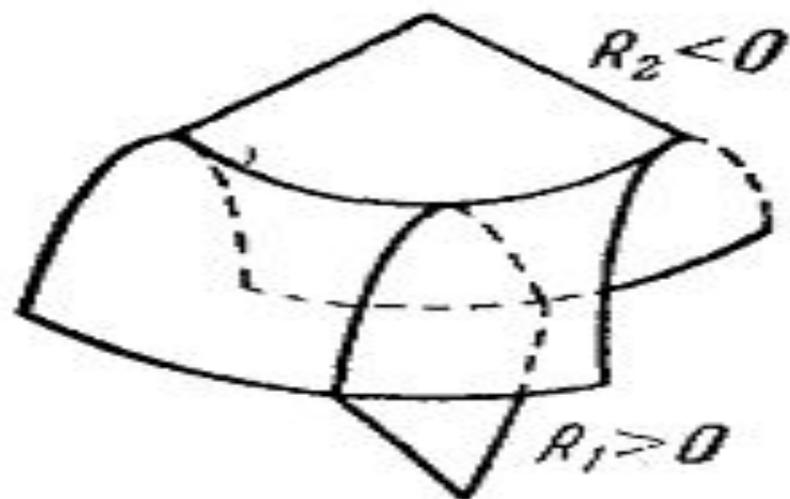


Рис. 316.

Силы поверхностного натяжения

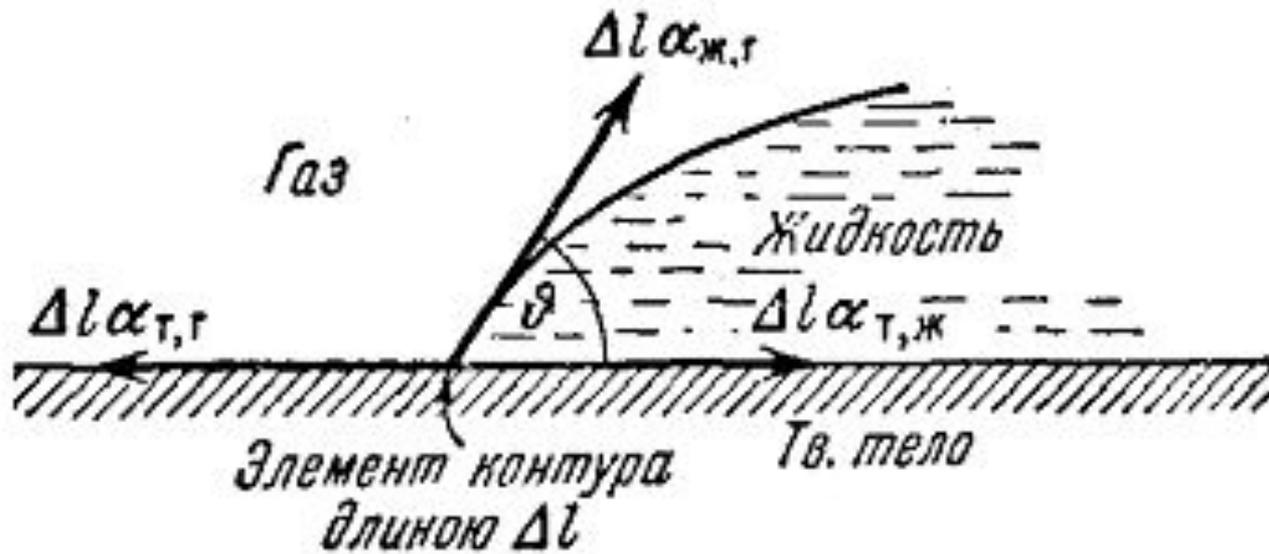


Рис. 319.

Полное смачивание (а) и полное несмачивание (б)

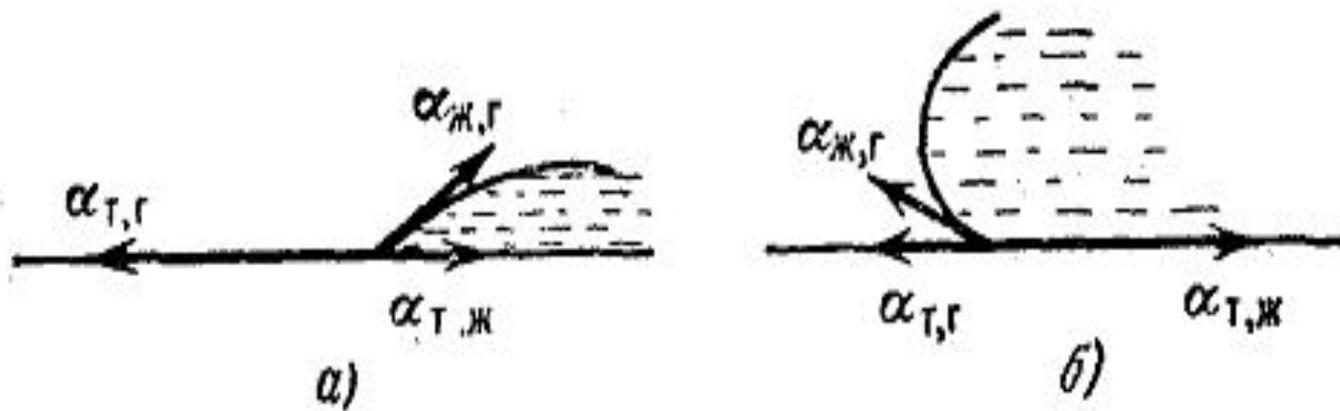


Рис. 320.

Частичное смачивание (а) и несмачивание (б)

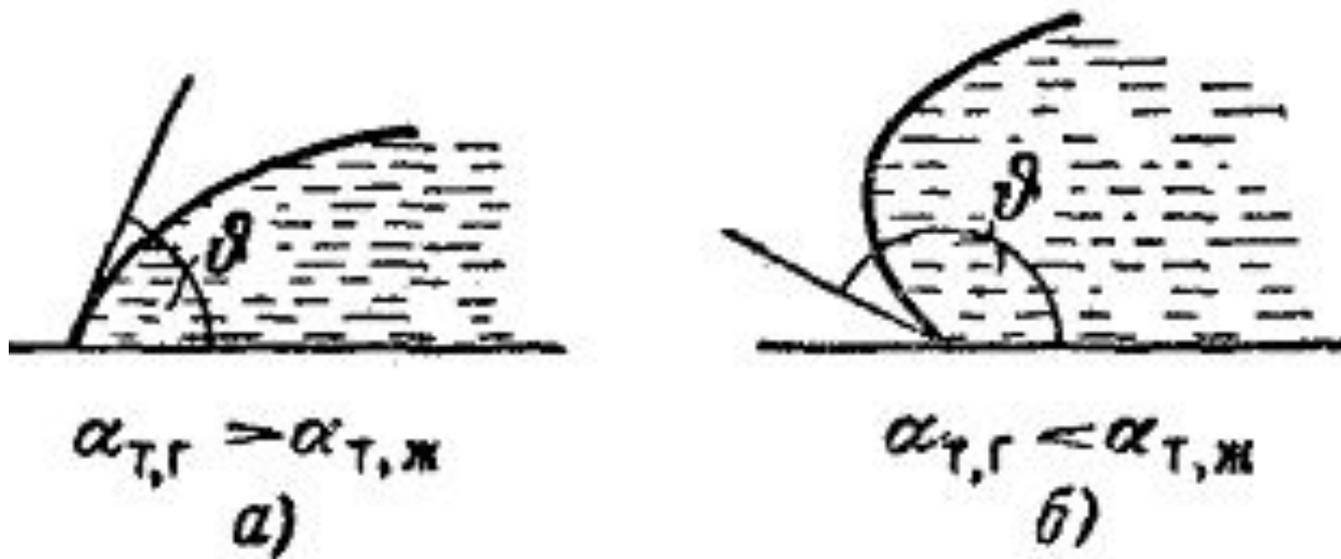


Рис. 321.

Давление под изогнутой поверхностью жидкости

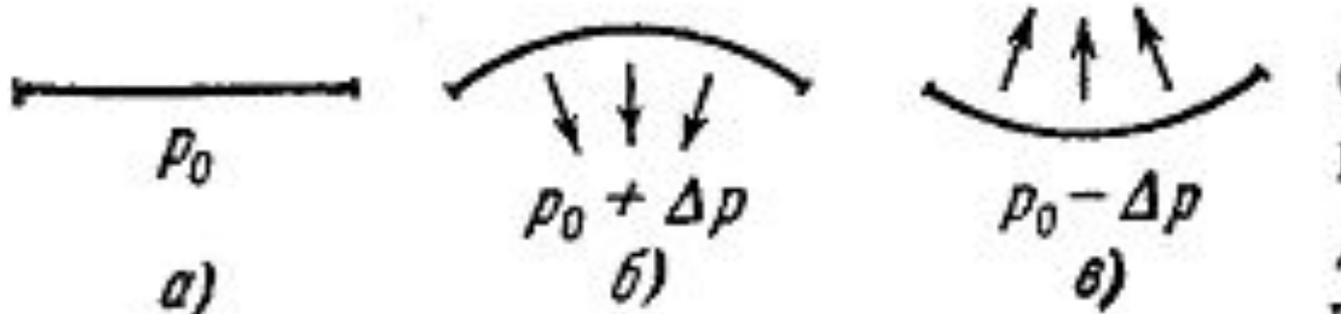


Рис. 314.

Зависимость полной энергии жидкости от высоты подъёма

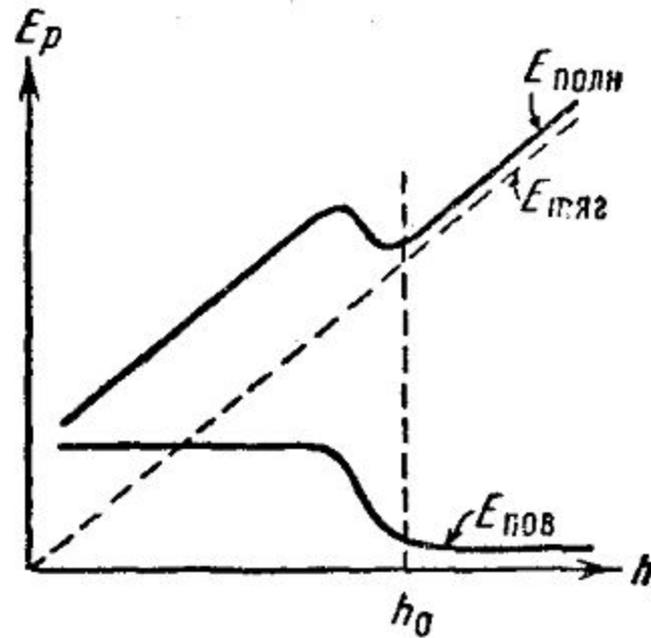


Рис. 322.

Поверхностное натяжение жидкости

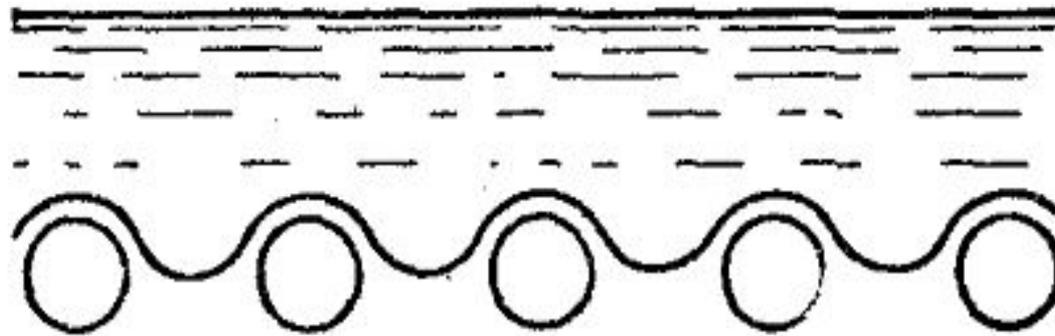


Рис. 323.

Явление смачивания на границе жидкость-
твёрдое тело



Рис. 326.

Лекция 13 (1)

1. Фазовые явления и превращения.
Необходимые условия равновесия фаз.
2. Системы с переменным числом частиц.
Химический потенциал как термодинамический аналог давления и температуры. Необходимые условия термодинамического равновесия подсистем с переменным числом частиц.
3. Испарение, конденсация, плавление и кристаллизация.
4. Плазменное состояние вещества.

Лекция 13 (2)

4. Приращение энтропии при фазовых превращениях.
5. Равновесие жидкости и насыщенного пара.
6. Изотермы Ван-дер-Ваальса. Изотермы реального газа.
7. Пересыщенный пар и перегретая жидкость. Критическое состояние. Аморфные тела.
8. Изотермы Ван-дер-Ваальса. Изотермы реального газа.
9. Демонстрации: Int2, Demo-NGU.

Равновесие жидкости и насыщенного пара

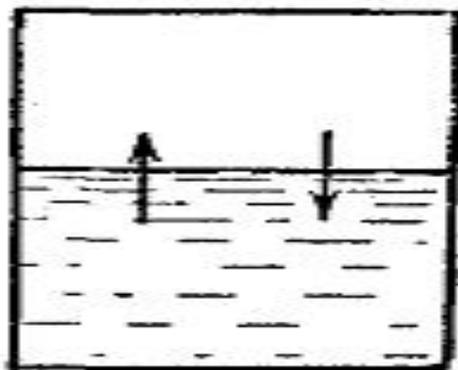
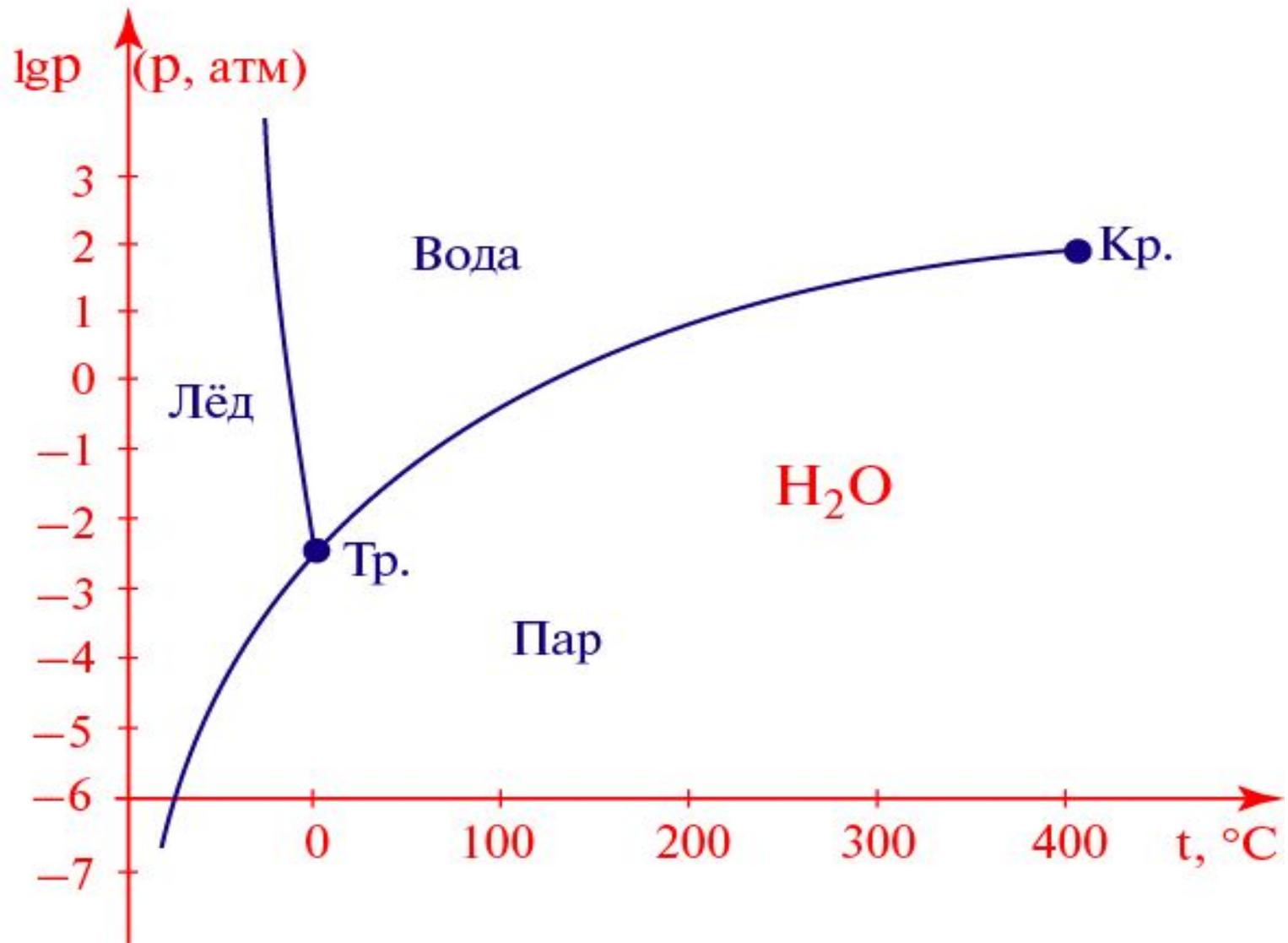
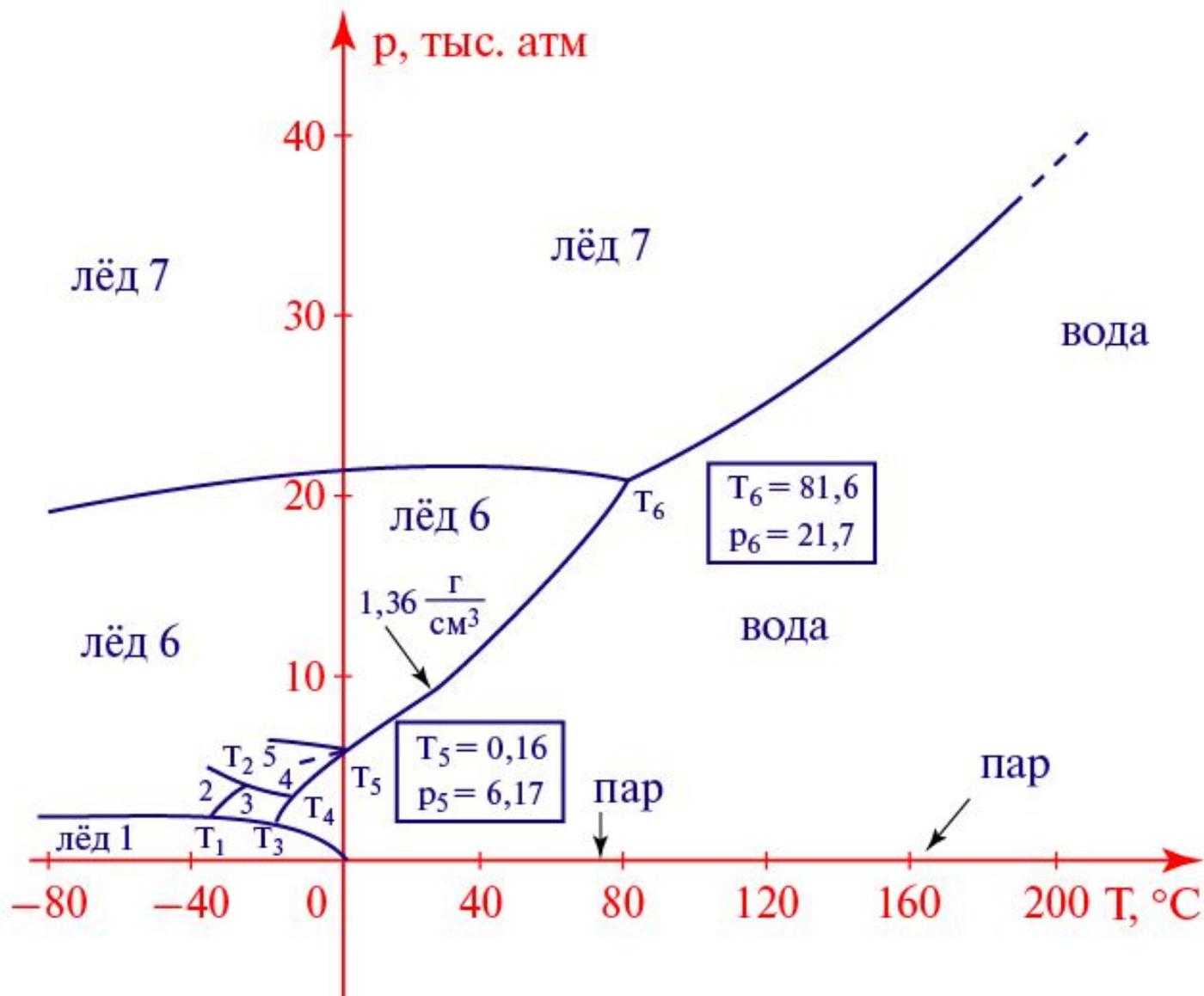


Рис. 327.

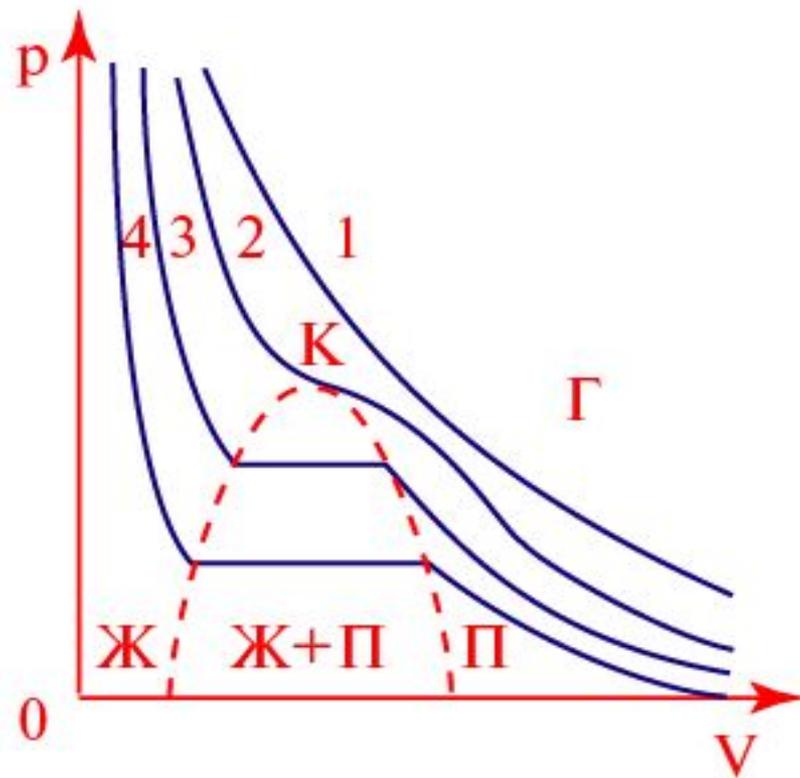
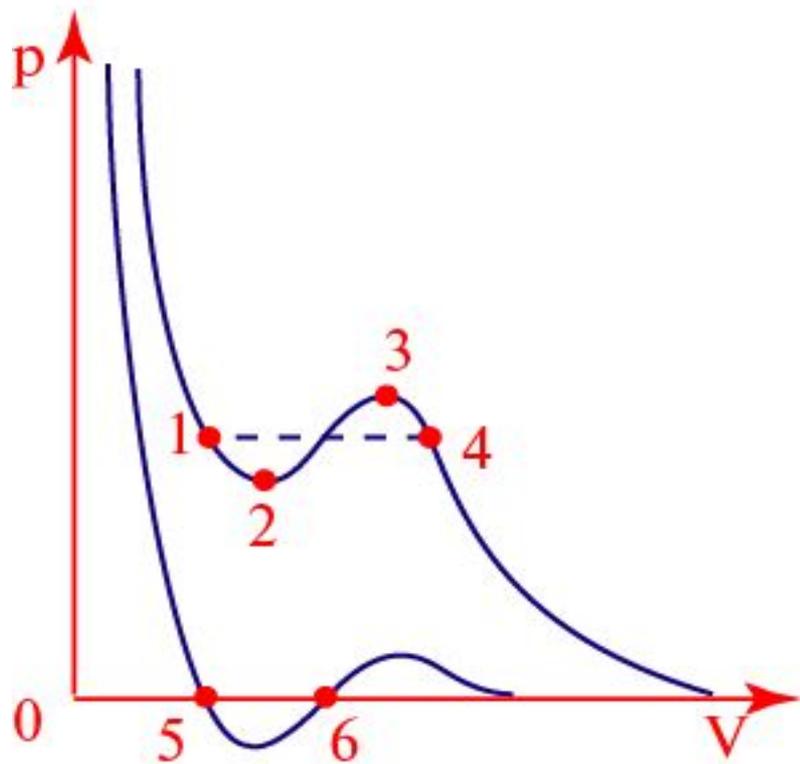
Фазовая диаграмма состояний для воды



Фазовая диаграмма состояний для модификаций воды



Изотермы Ван-дер Ваальсовского и реального газа (1)



Потенциал межмолекулярного взаимодействия

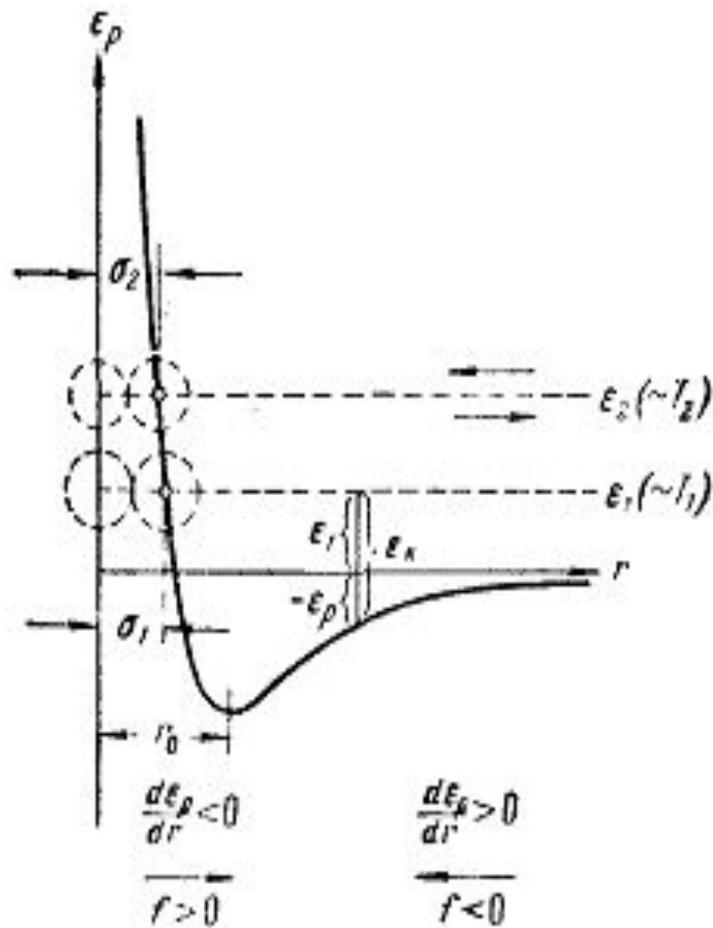


Рис. 264.

Упругие столкновения между частицами

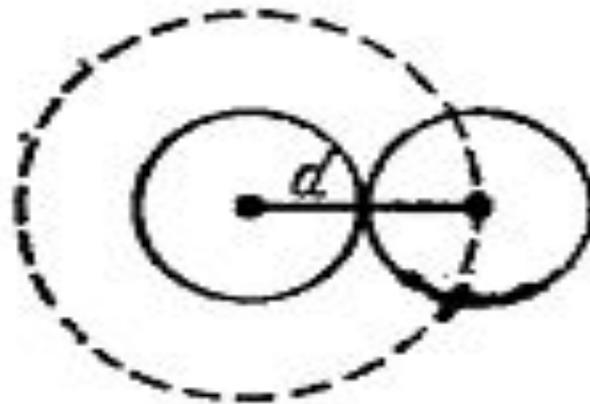


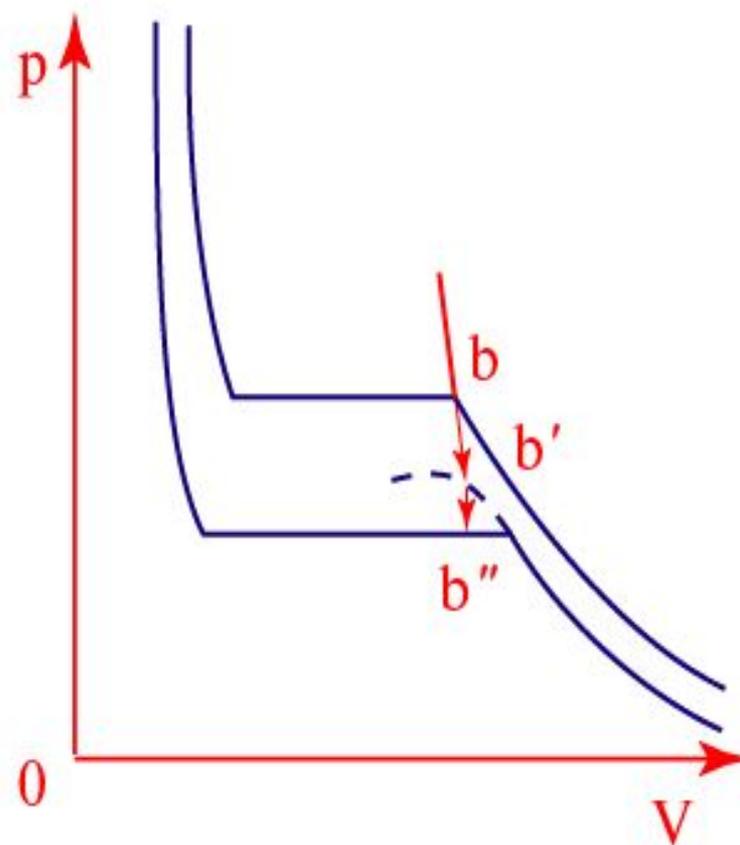
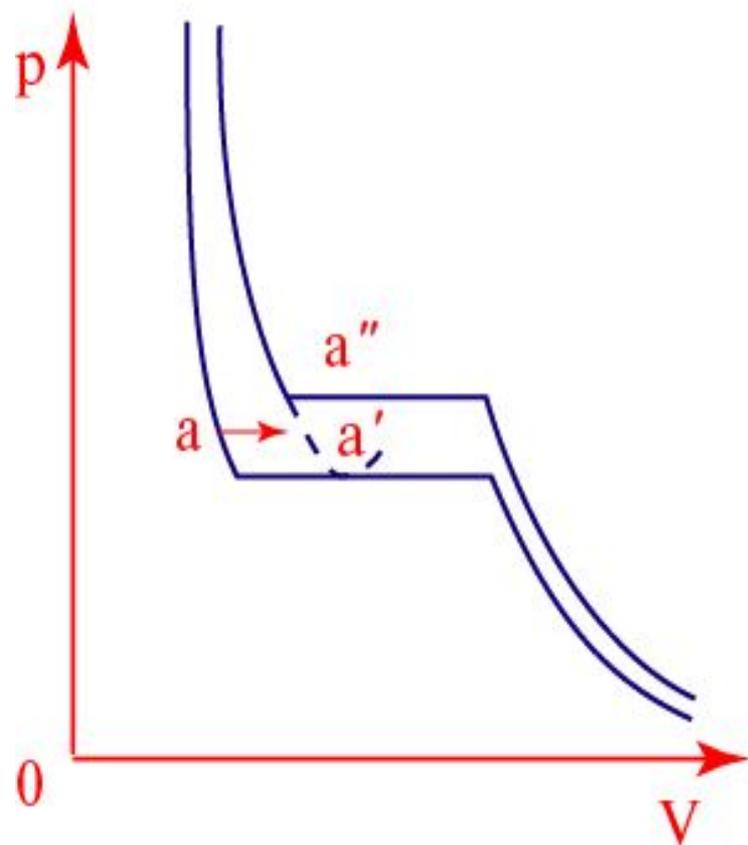
Рис. 266.

Взаимодействие частиц в пограничном слое

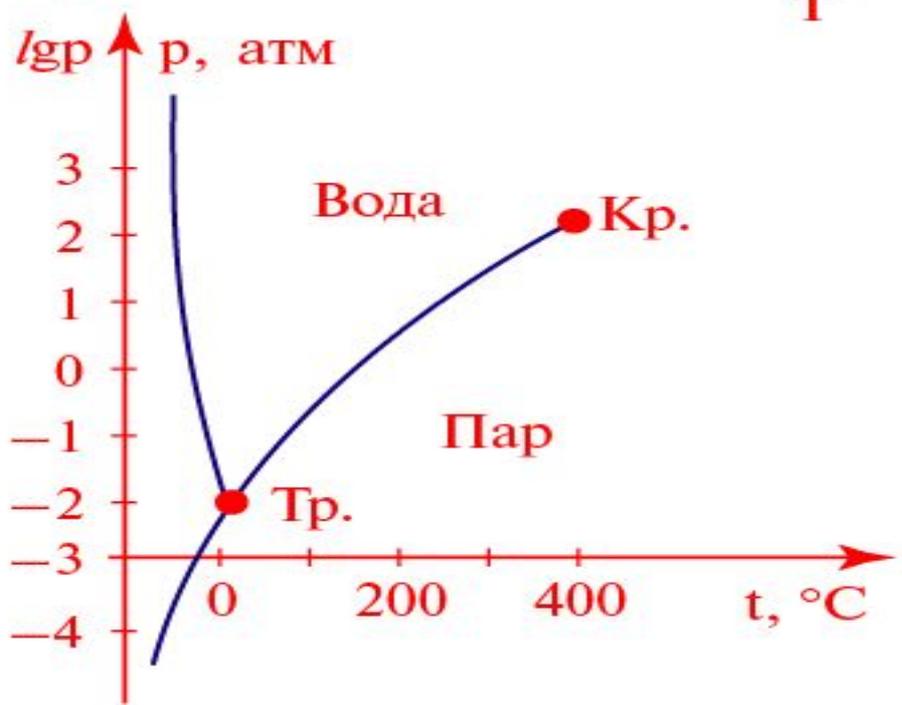
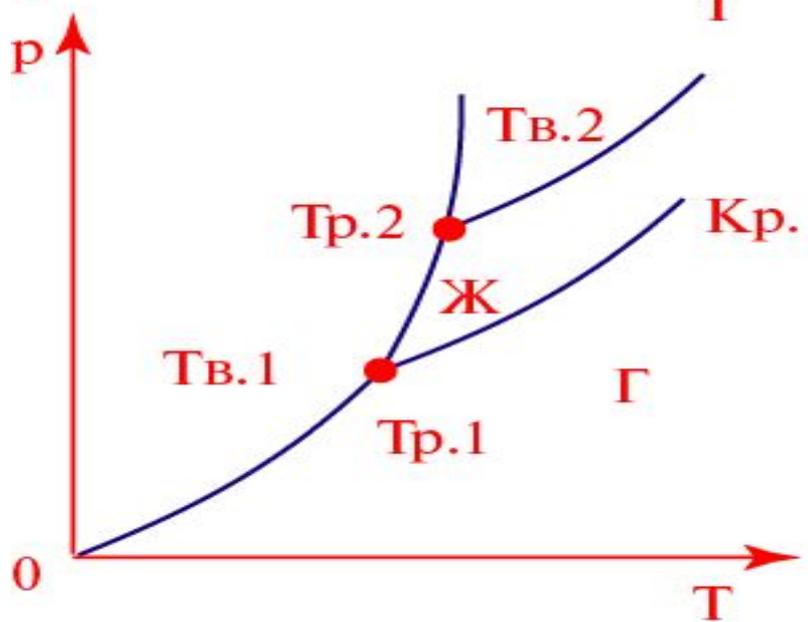
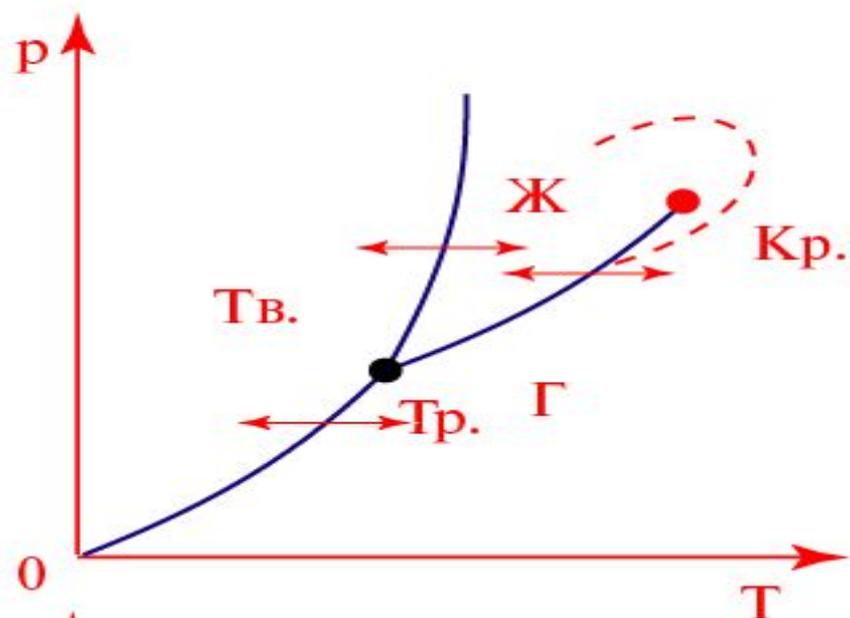
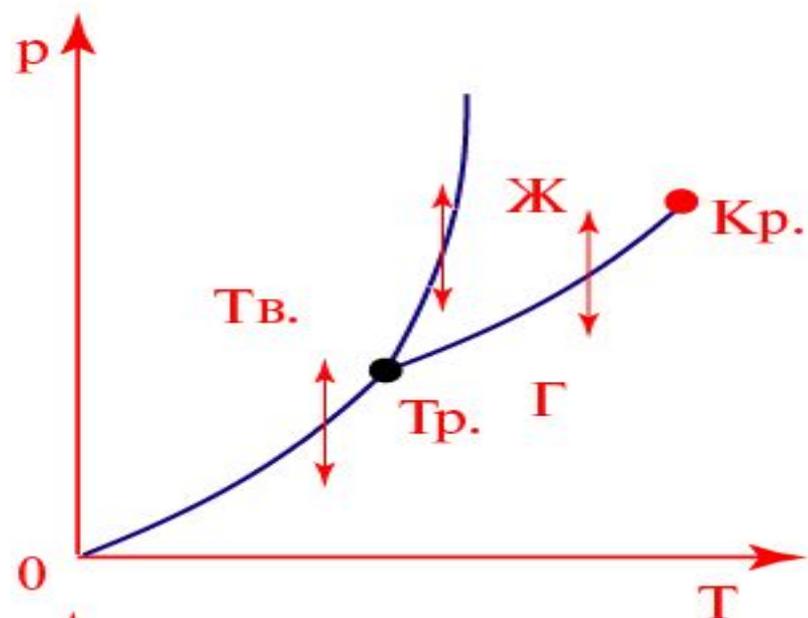


Рис. 267.

Изотермы реального газа (1)



Фазовые диаграммы



Тройная точка на фазовой диаграмме состояний вещества

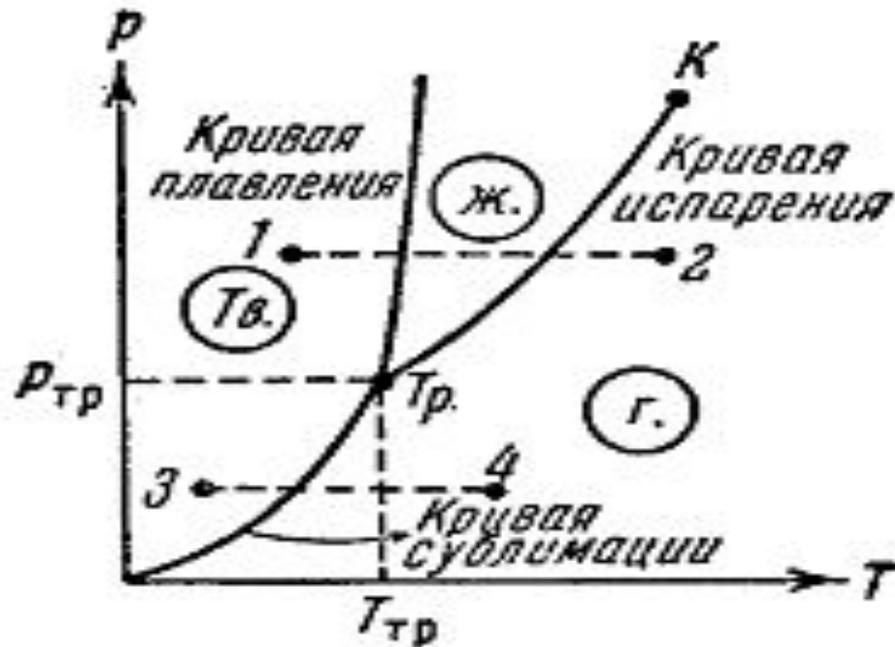


Рис. 331.

Фазовые превращения

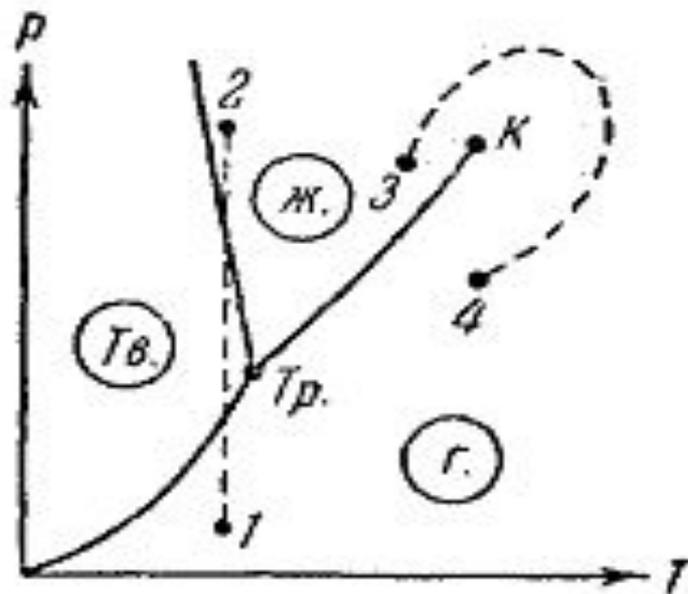


Рис. 332.

Фазовые модификации вещества

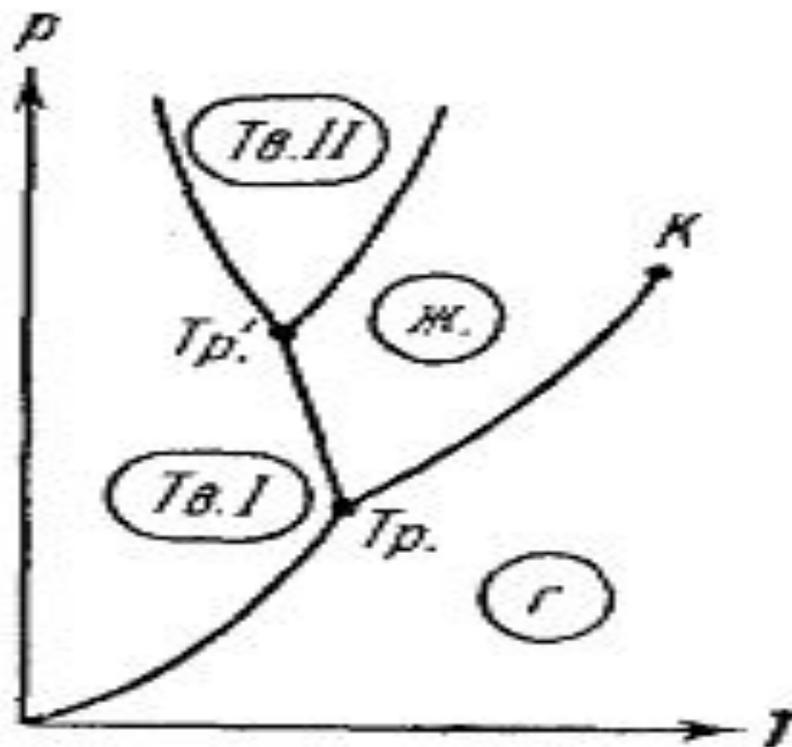
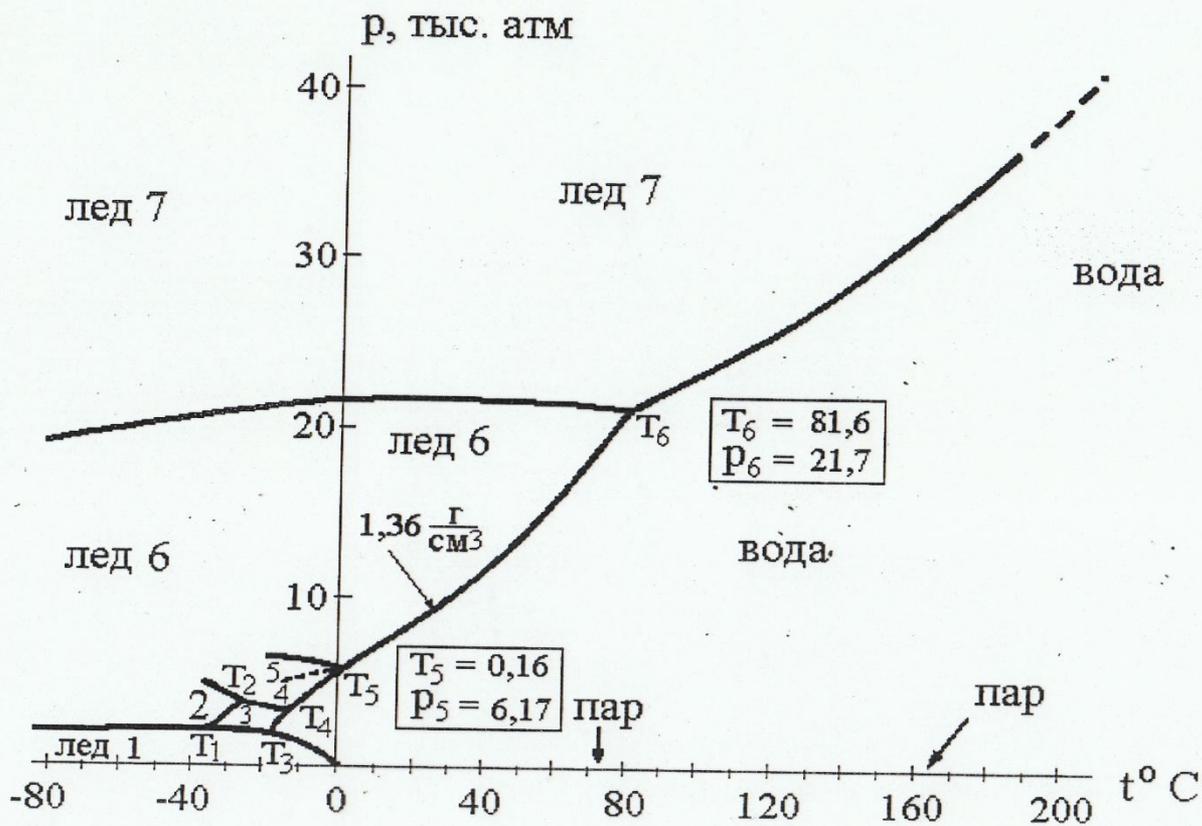
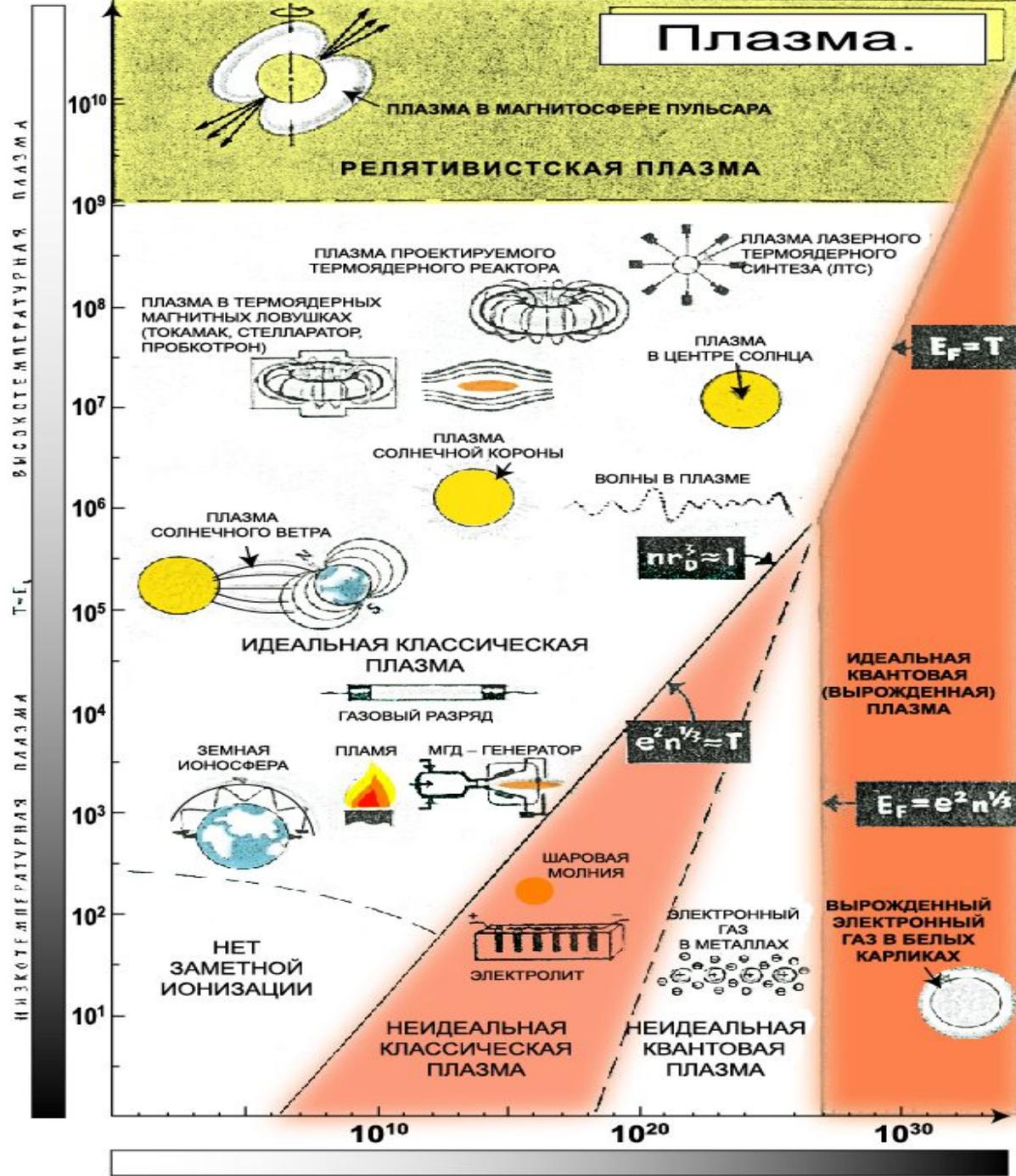


Рис. 333.

Модификации льда



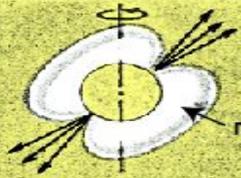


Плазма.

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА
 НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА

10^{10}
 10^9
 10^8
 10^7
 10^6
 10^5
 10^4
 10^3
 10^2
 10^1

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ПЛАЗМА

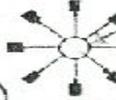


ПЛАЗМА В МАГНИТОСФЕРЕ ПУЛЬСАРА

ПЛАЗМА ПРОЕКТИРУЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА



ПЛАЗМА ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА (ЛТС)



ПЛАЗМА В ТЕРМОЯДЕРНЫХ МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ (ТОКАМАК, СТЕЛЛАТОР, ПРОБКЕТРОН)



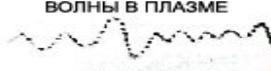
ПЛАЗМА В ЦЕНТРЕ СОЛНЦА



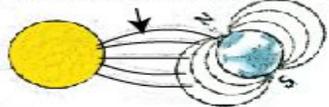
ПЛАЗМА СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ



ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ



ПЛАЗМА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА



$nr_D^2 \approx 1$

ИДЕАЛЬНАЯ КЛАССИЧЕСКАЯ ПЛАЗМА



ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД

ЗЕМНАЯ ИОНОСФЕРА



ПЛАМЯ



МГД-ГЕНЕРАТОР



$e^2 n^{1/3} = T$

ИДЕАЛЬНАЯ КВАНТОВАЯ (ВЫРОЖДЕННАЯ) ПЛАЗМА

$E_F = e^2 n^{1/3}$

ШАРОВАЯ МОЛНИЯ



ЭЛЕКТРОННЫЙ ГАЗ В МЕТАЛЛАХ

ВЫРОЖДЕННЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ГАЗ В БЕЛЫХ КАРЛИКАХ



НЕТ ЗАМЕТНОЙ ИОНИЗАЦИИ

НЕИДЕАЛЬНАЯ КЛАССИЧЕСКАЯ ПЛАЗМА

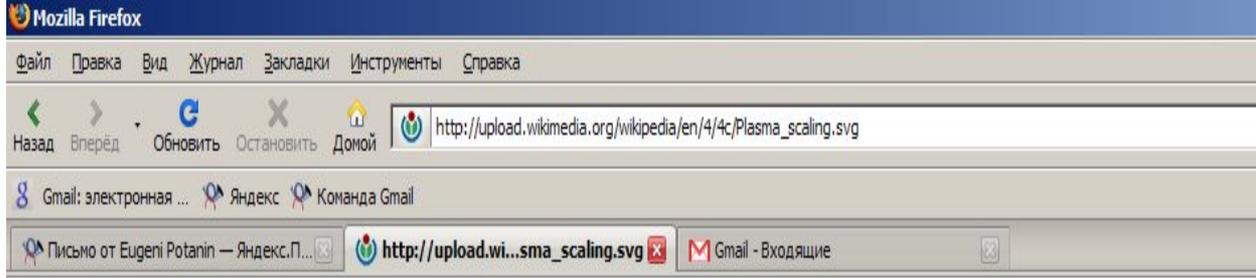
НЕИДЕАЛЬНАЯ КВАНТОВАЯ ПЛАЗМА

10^{10}

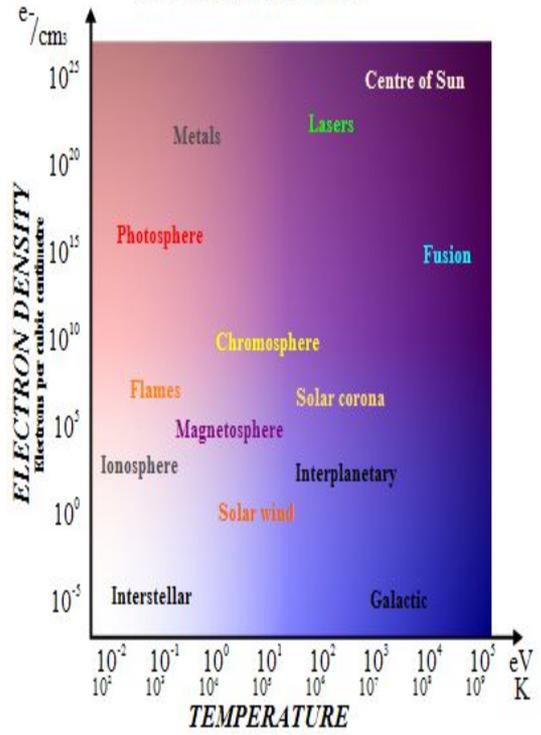
10^{20}

10^{30}

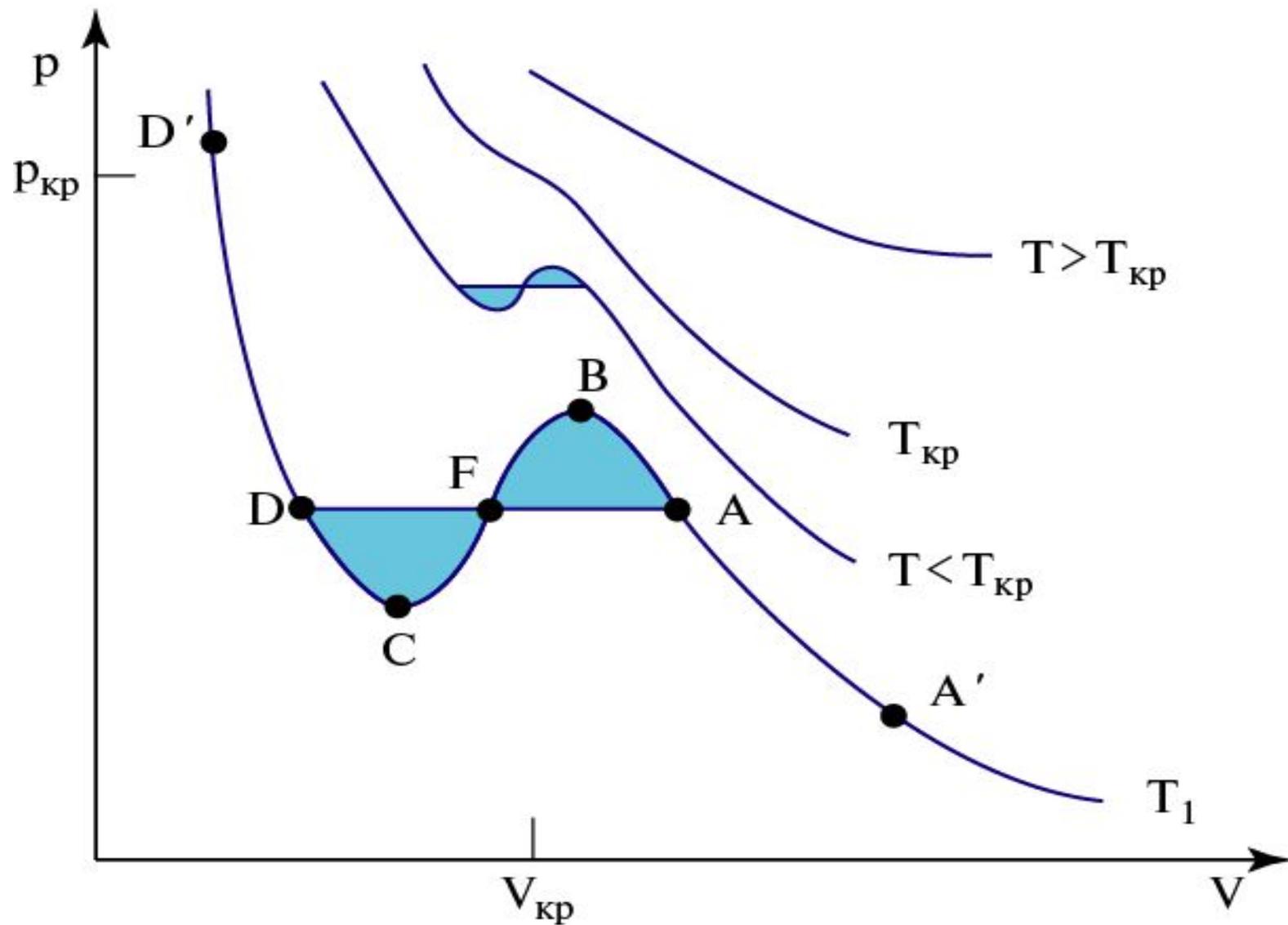
ПЛОТНОСТИ ВЕЩЬИ CM^{-3}



RANGES OF PLASMAS



Изотермы уравнения Ван-дер-Ваальса



Изотермы Ван-дер-Ваальса

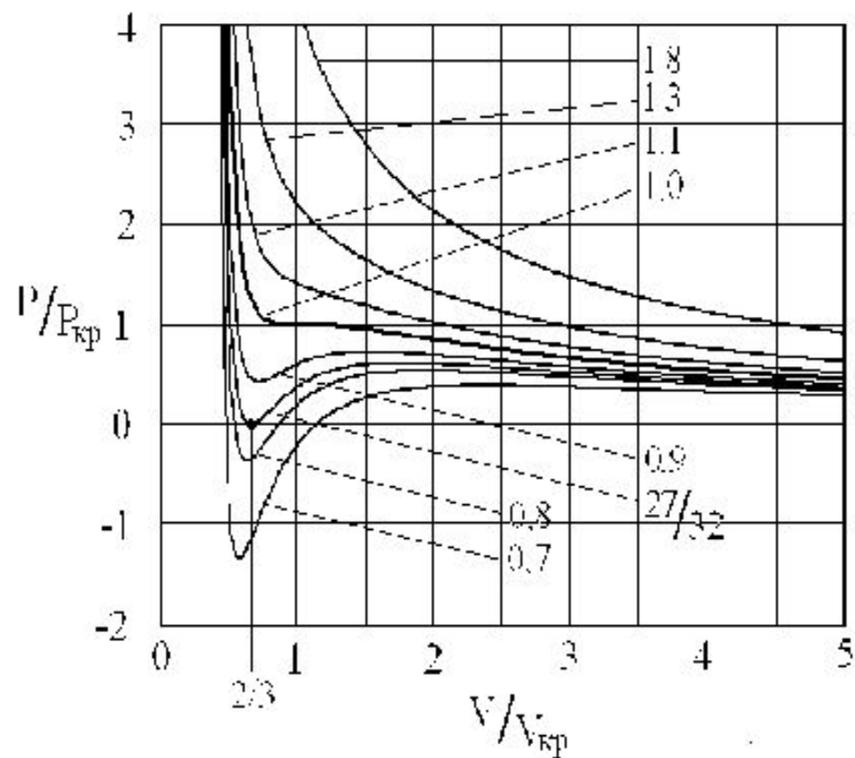


Таблица 10

$p, ат$	$pV, ат \cdot л$	$\left(p + \frac{a'}{V^2}\right) (V - b'), ат \cdot л$
1	1,000	1,000
100	0,994	1,000
200	1,048	1,009
500	1,390	1,014
1000	2,069	0,893

К уравнению Клапейрона -Клаузиуса

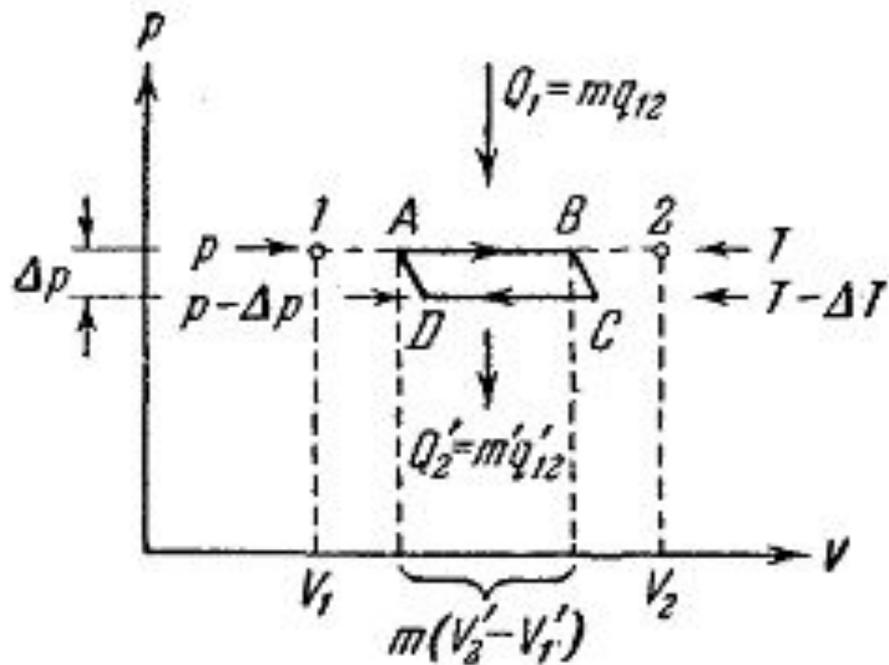


Рис. 330.

Лекция 14

1. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.
2. Явления переноса. Эмпирические законы диффузии, теплопроводности и вязкости.
3. Средняя длина свободного пробега молекул. Среднее время свободного пробега молекул.
4. Эффективное поперечное сечение взаимодействия молекул. Газокинетический радиус молекулы.
5. Выражения для коэффициентов переноса (зависимость от температуры и давления газа).
6. Демонстрации: Int2, Demo-NGU.

Потенциальная энергия взаимодействия между молекулами

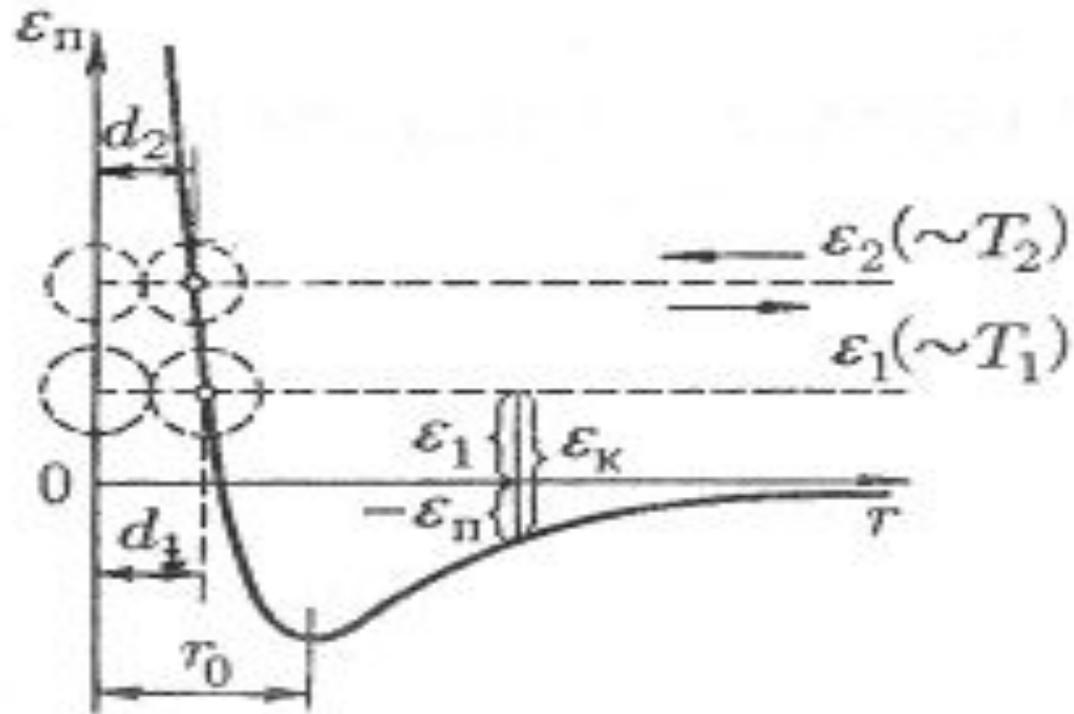


Рис. 7.3

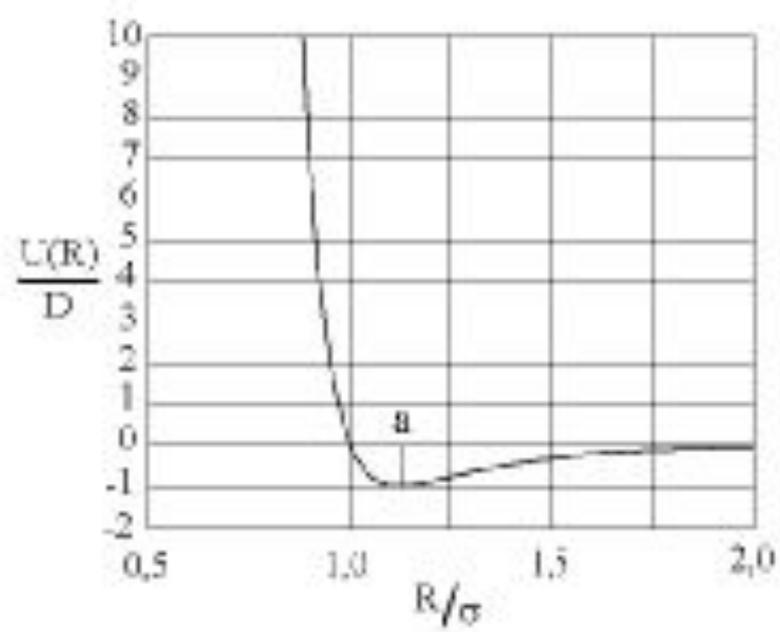


Рис. 1 Потенциал Ленард - Джонса

Длина свободного пробега частиц

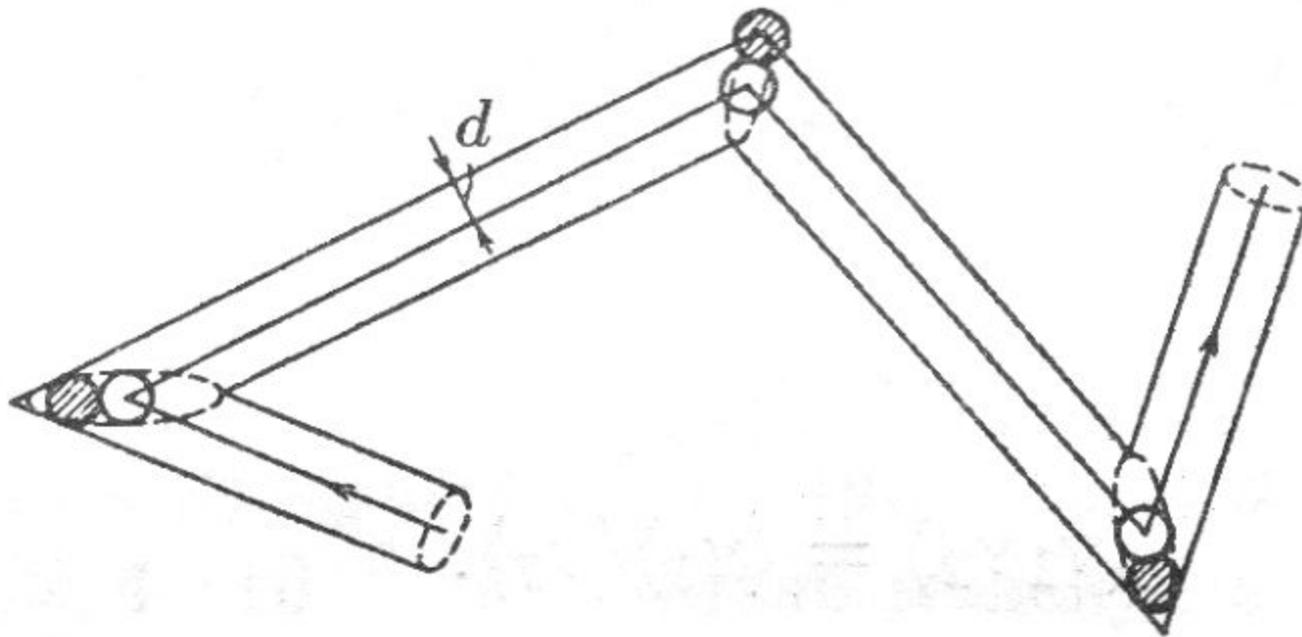


Рис. 7.5

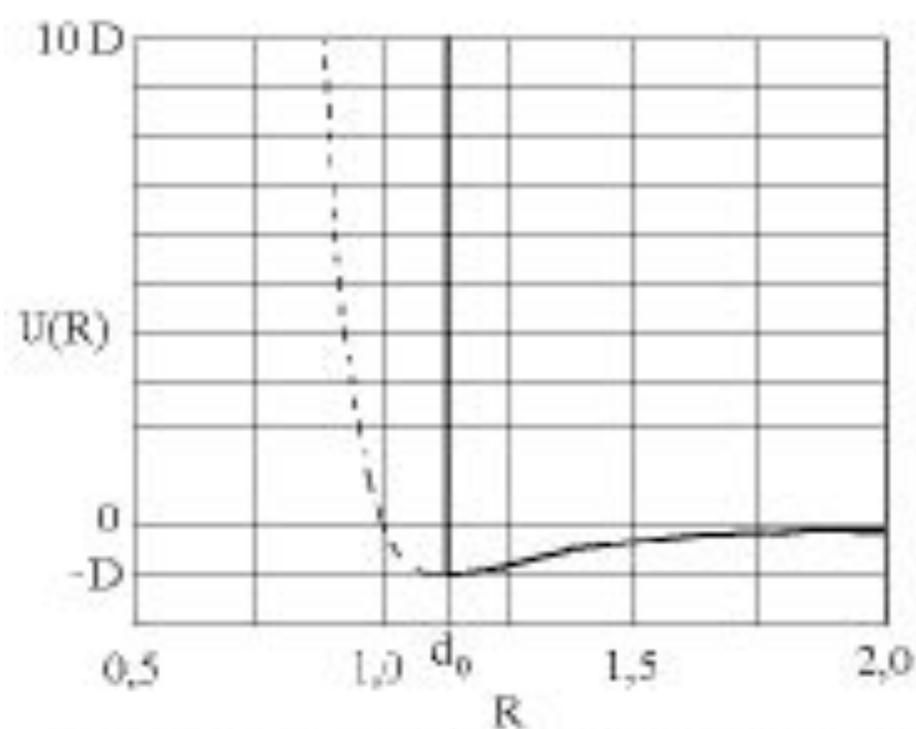


Рис. 2. Упрощенный модельный потенциал взаимодействия молекул газ-дер-вальсовского газа; d_0 - диаметр молекулы, D - глубина потенциальной ямы.

Сечение упругого соударения частиц

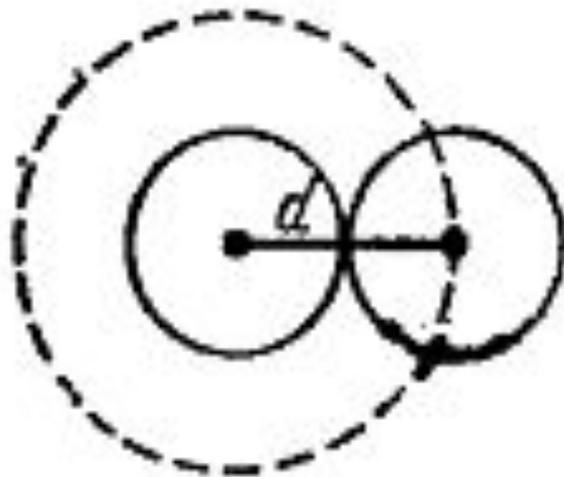
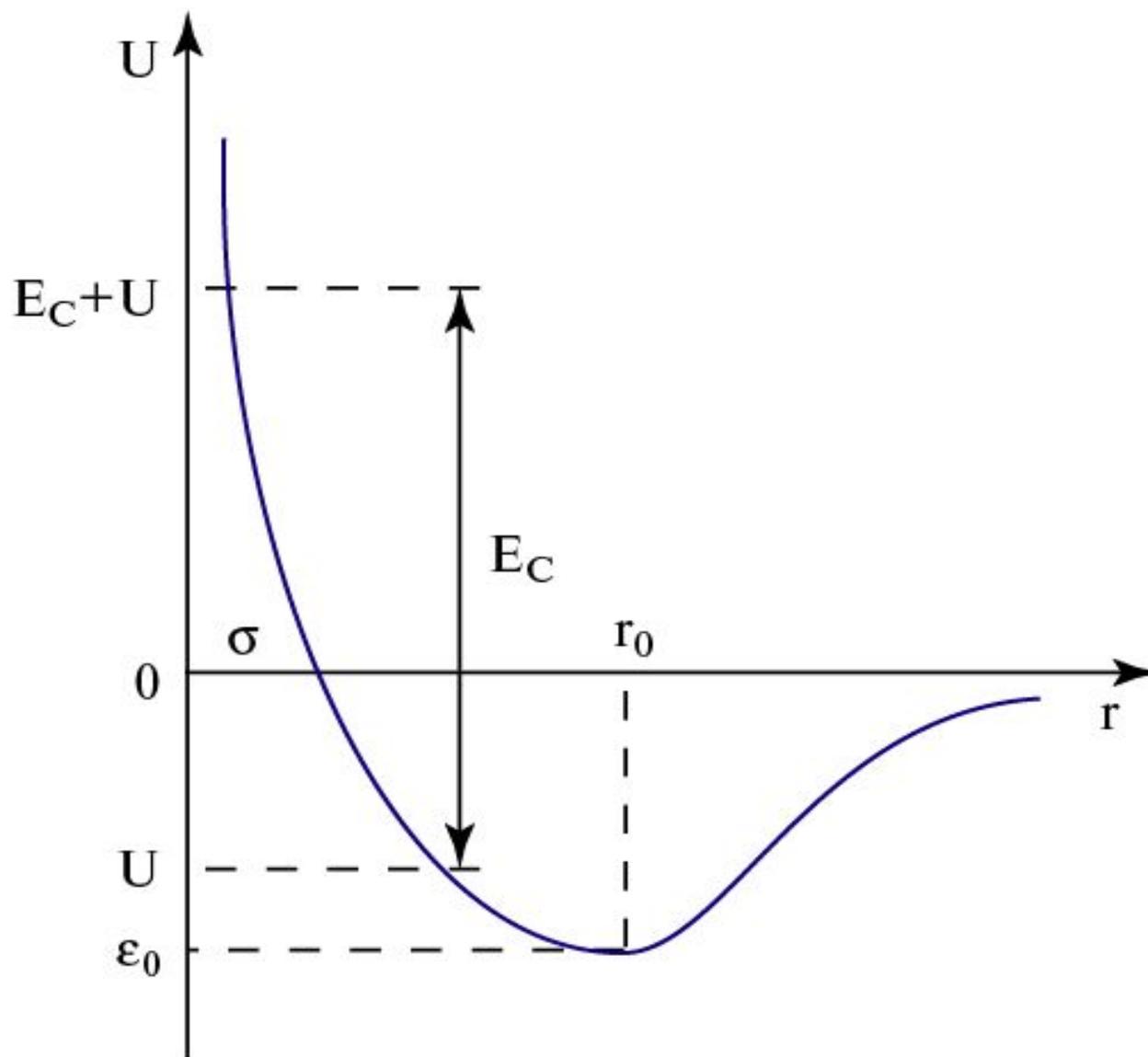
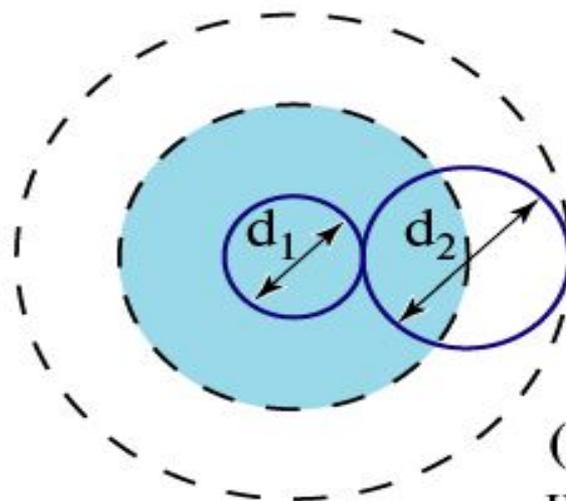
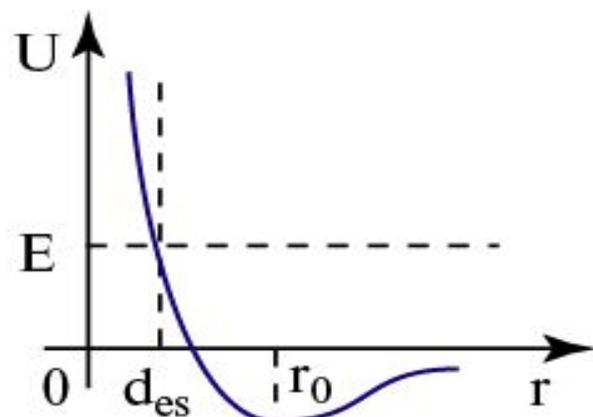


Рис. 266.

Потенциал межмолекулярного взаимодействия



Сечение упругого соударения

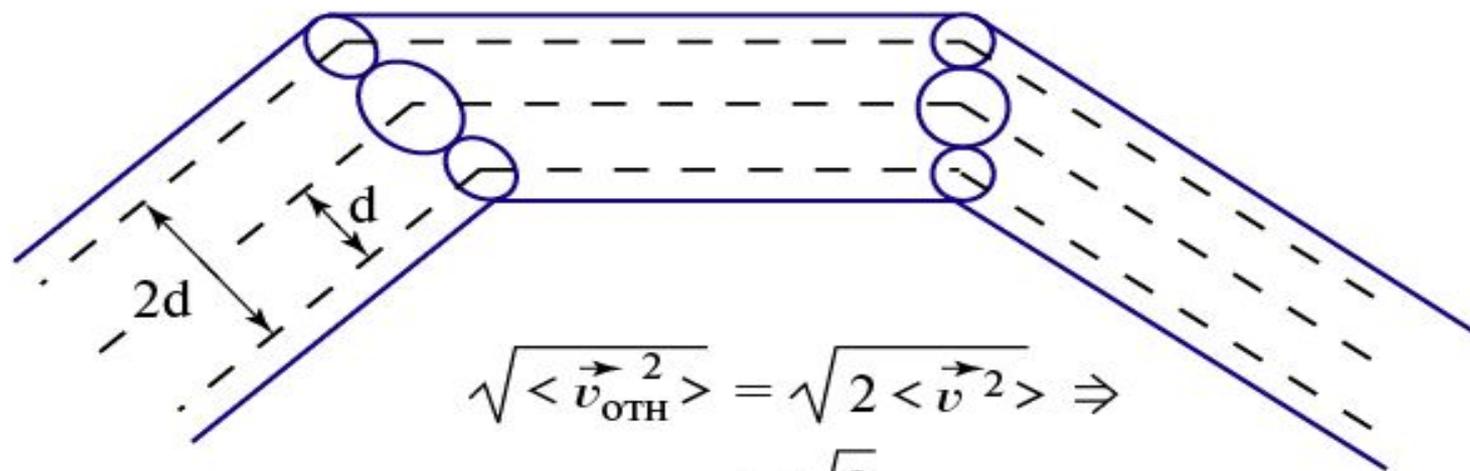


$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$\sigma_{\text{упр}} = \pi d^2$$

(с неподв.
частицами)

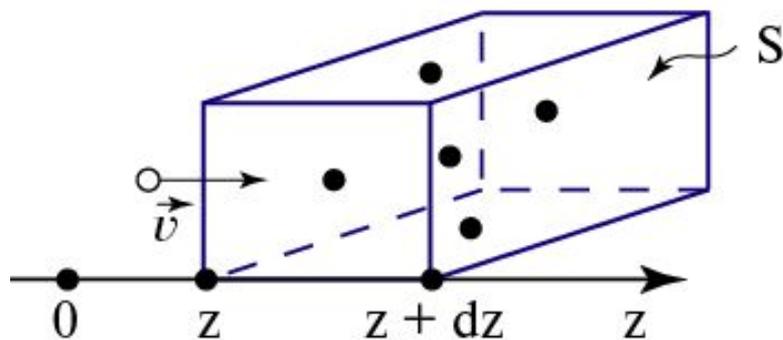
$$\vec{v}_{\text{отн}} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2 \quad ; \quad \langle \vec{v}_{\text{отн}}^2 \rangle = \langle \vec{v}_1^2 \rangle - 2 \langle (\vec{v}_1, \vec{v}_2) \rangle + \langle \vec{v}_2^2 \rangle = \langle \vec{v}^2 \rangle.$$



$$\sqrt{\langle \vec{v}_{\text{отн}}^2 \rangle} = \sqrt{2 \langle \vec{v}^2 \rangle} \Rightarrow$$

$$v_{\text{отн ср. кв}} = \sqrt{2} v_{\text{ср. кв}}$$

Длина свободного пробега — λ



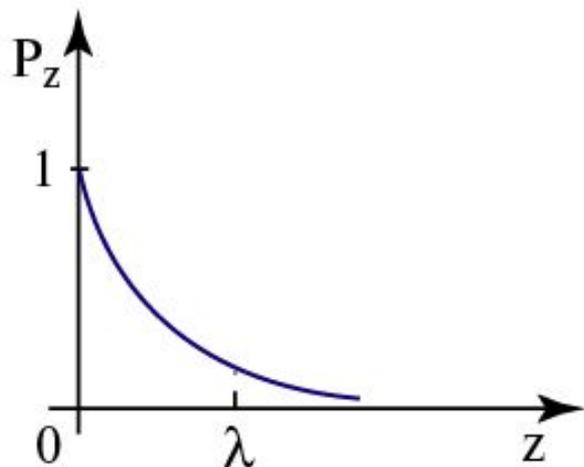
$$\int dP_{v,z} = \int dP_v \int dP_z =$$

$$= \int F(v) dv \int dP_z = 1$$

$$dP_z = -dP_z^{\text{cr}} = -\frac{\sqrt{2} \langle \sigma \rangle n S P_z dz}{S}$$

$$\frac{dP_z}{P_z} = -\frac{dz}{\lambda} \Rightarrow P_z = c e^{-\frac{z}{\lambda}}; \quad \lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \langle \sigma \rangle n}$$

$$z=0, \quad P_z(0) = 1 \Rightarrow c = 1.$$



$$\int dP_z = 1;$$

$$c \int_0^{\infty} \frac{e^{-\frac{z}{\lambda}}}{\lambda} dz = -c e^{-\frac{z}{\lambda}} \Big|_0^{\infty} = 1.$$

физ. смысл λ !

Лекция 15

1. Газокинетический вывод уравнений диффузии, теплопроводности и вязкости для газов.
2. Трение и теплопроводность в ультра-разреженных газах.
3. Представление о фракталах.
4. Демонстрации: Int2, Demo-NGU.

К модели диффузии газа (1)

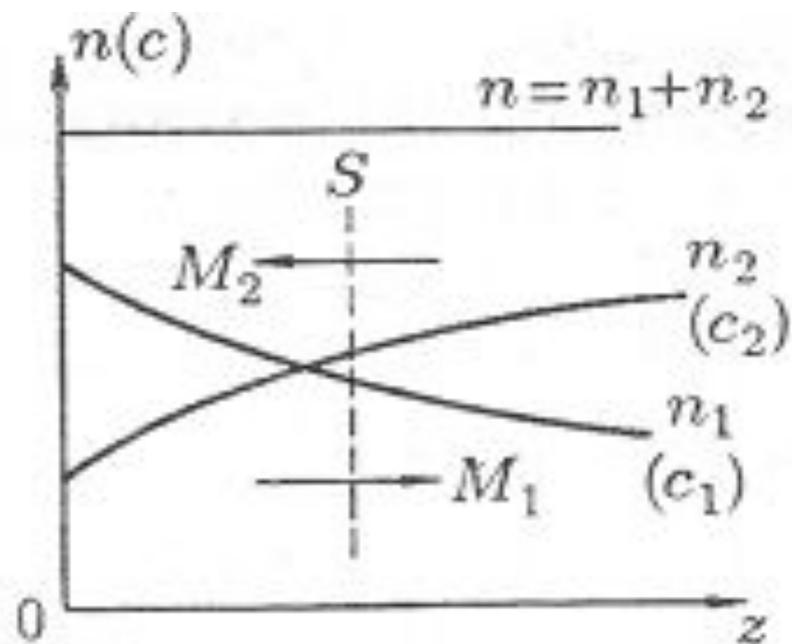


Рис. 7.1

К модели диффузии газа (2)

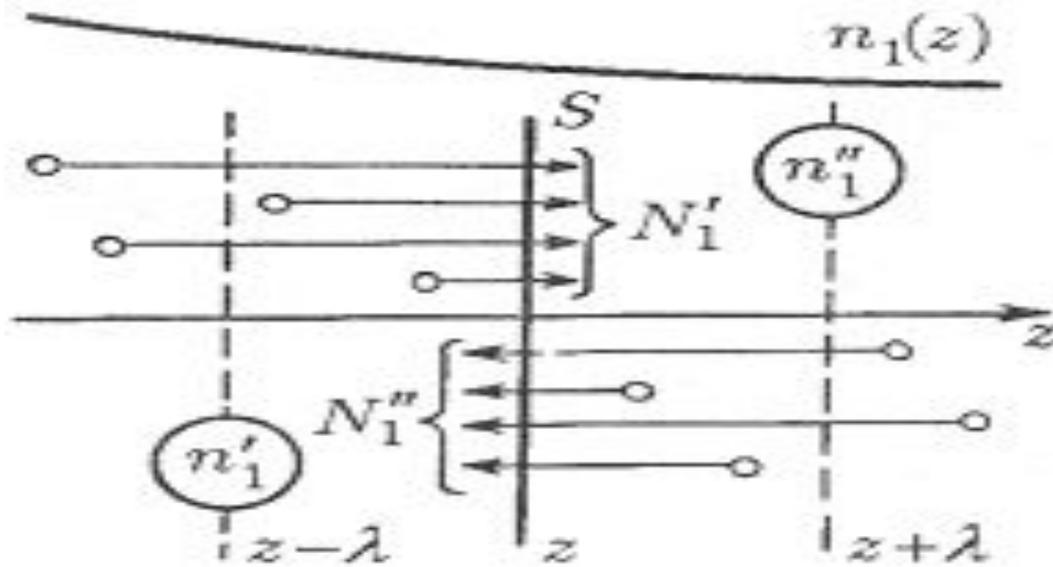


Рис. 7.6

К модели теплопроводности газа

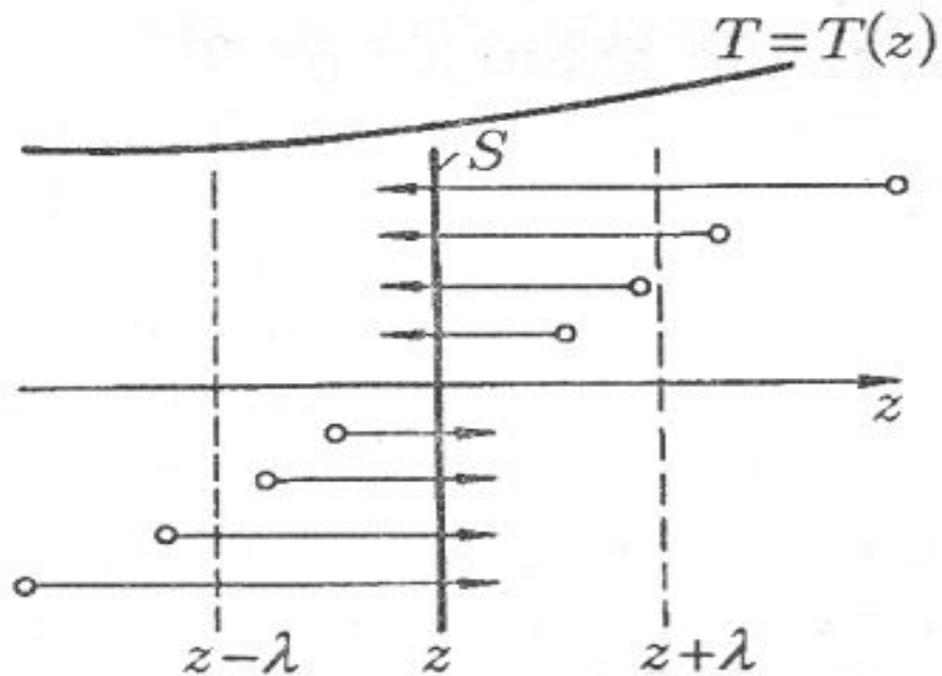


Рис. 7.7

К понятию вязкости

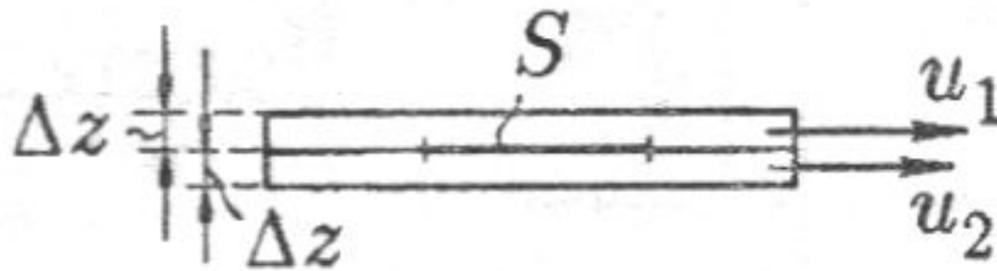


Рис. 7.8

Модель вязкости

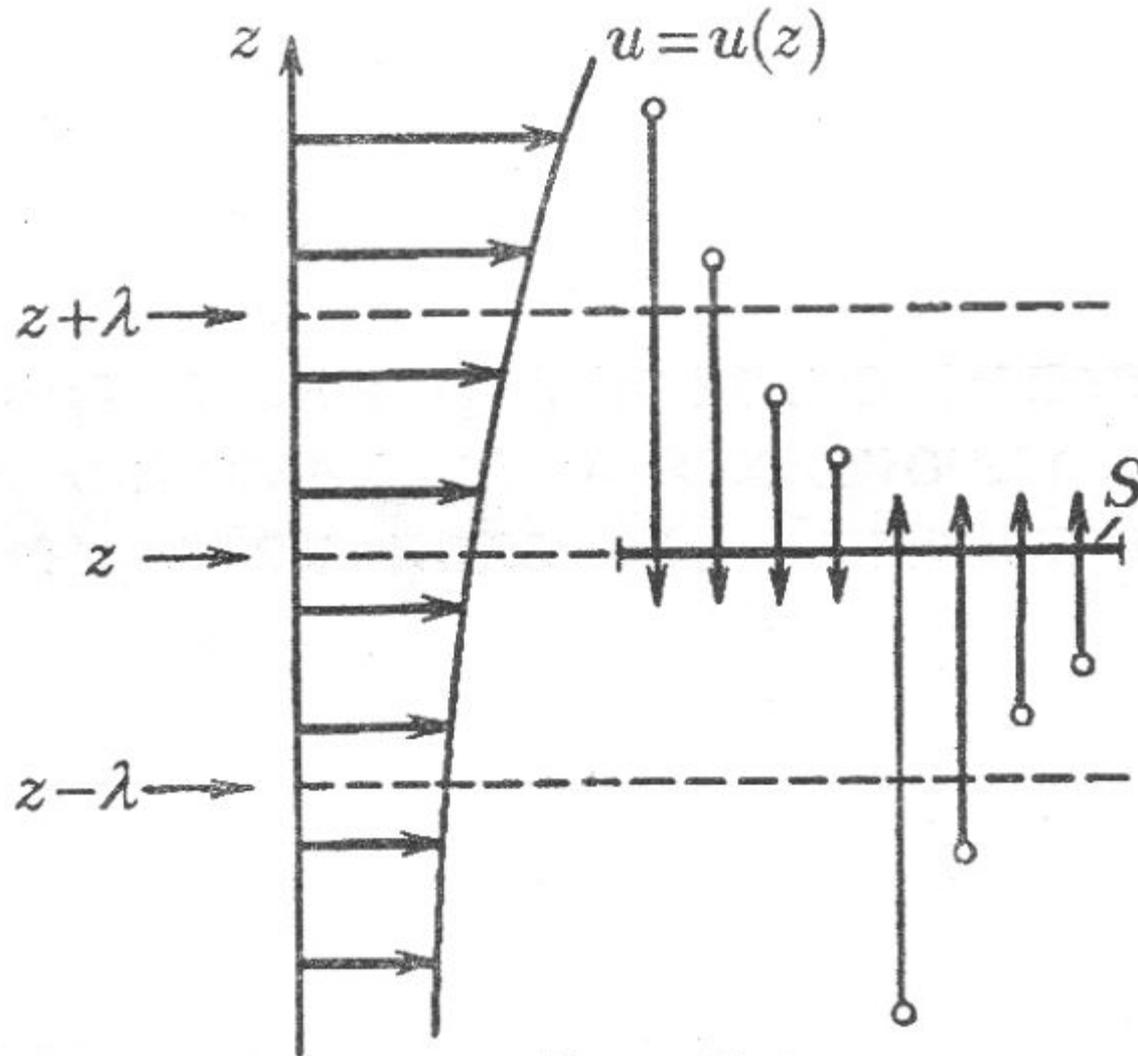
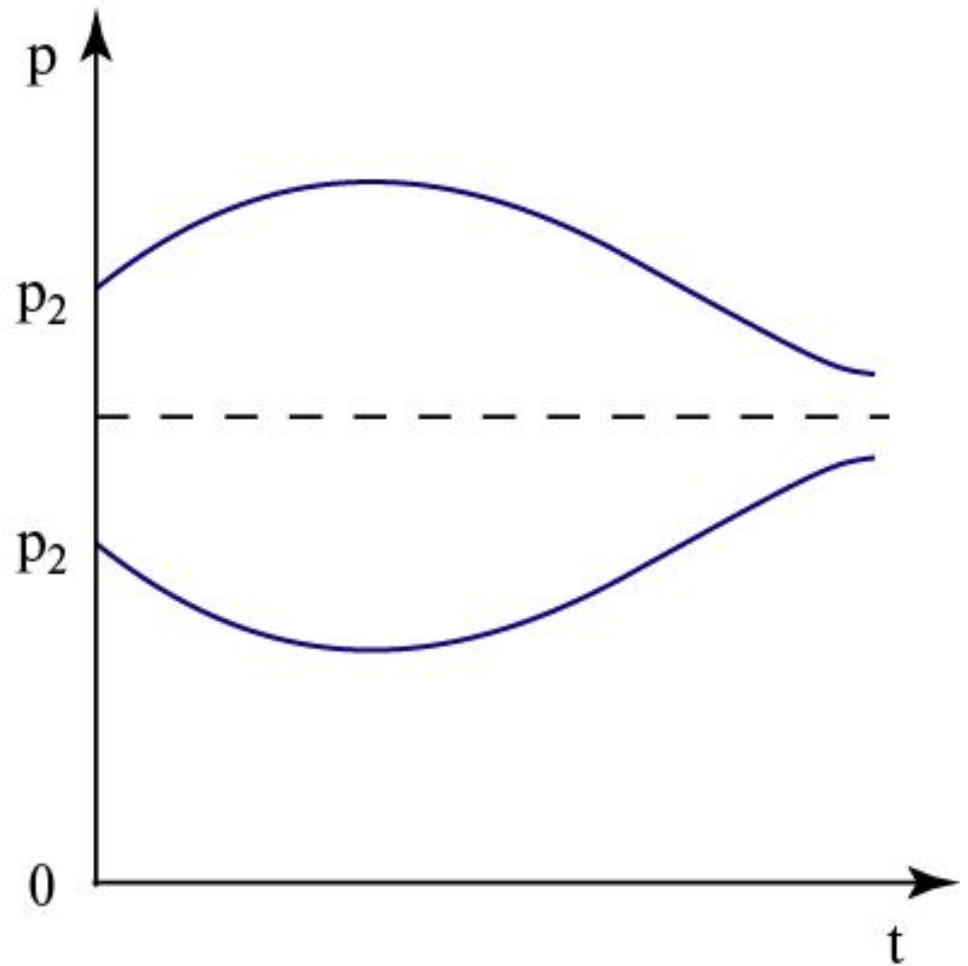
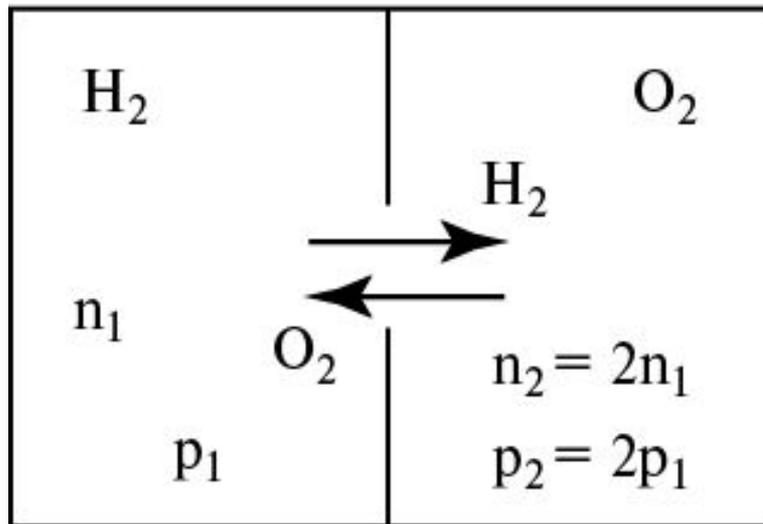


Рис. 7.9

Эффузия



Разреженный газ между двумя пластинами

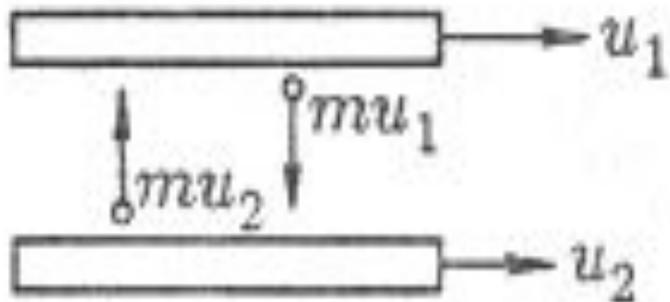


Рис. 7.10

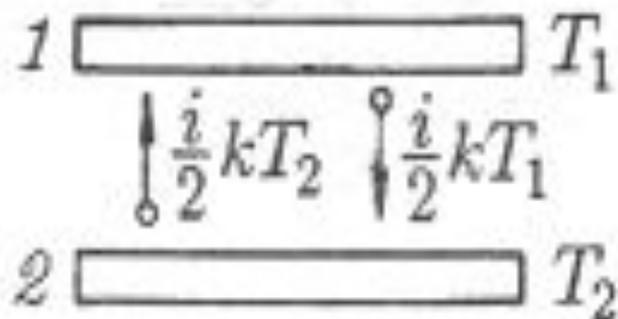


Рис. 7.11

Эффузия

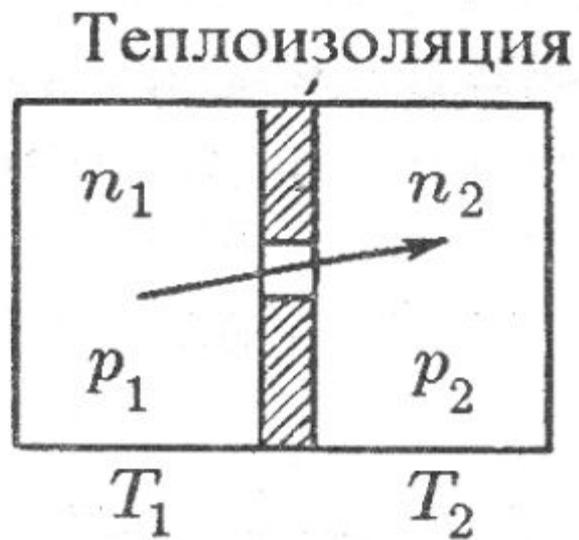


Рис. 7.13

Встречная эффузия

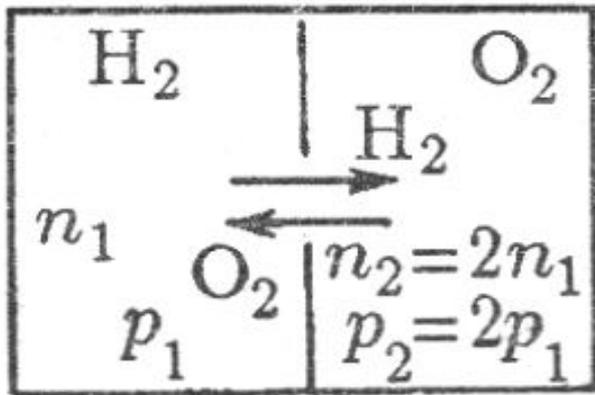


Рис. 7.14

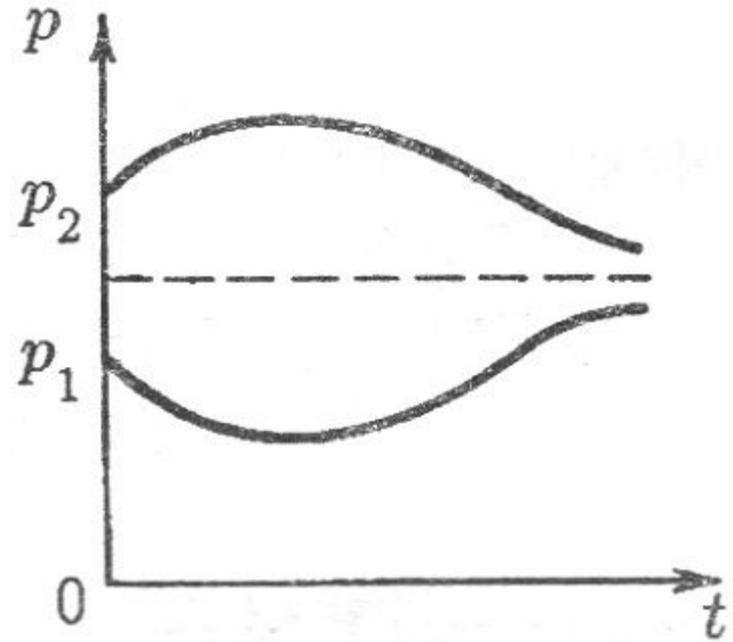


Рис. 7.15

Разделение изотопов эффузионным способом

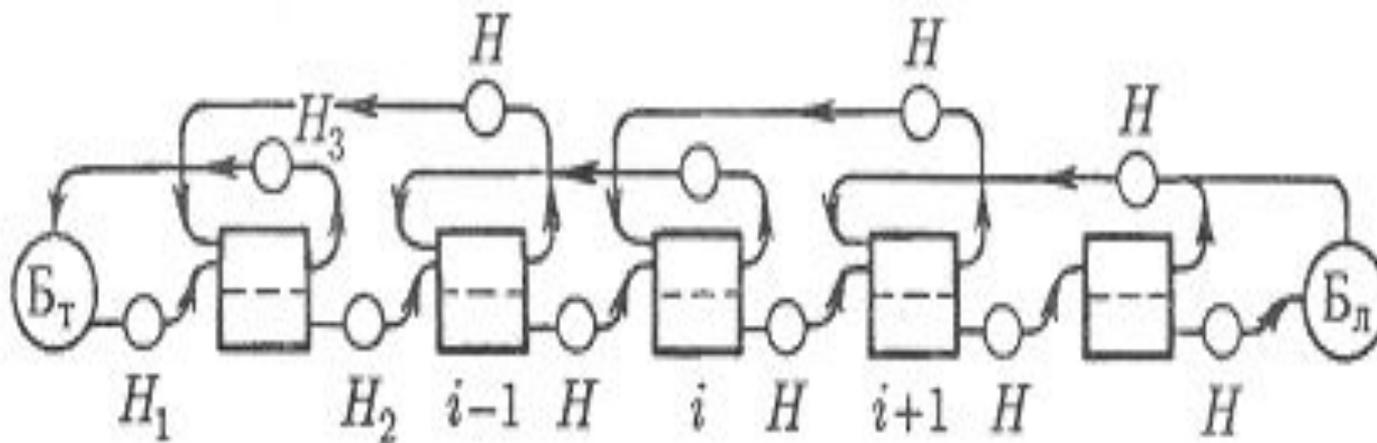
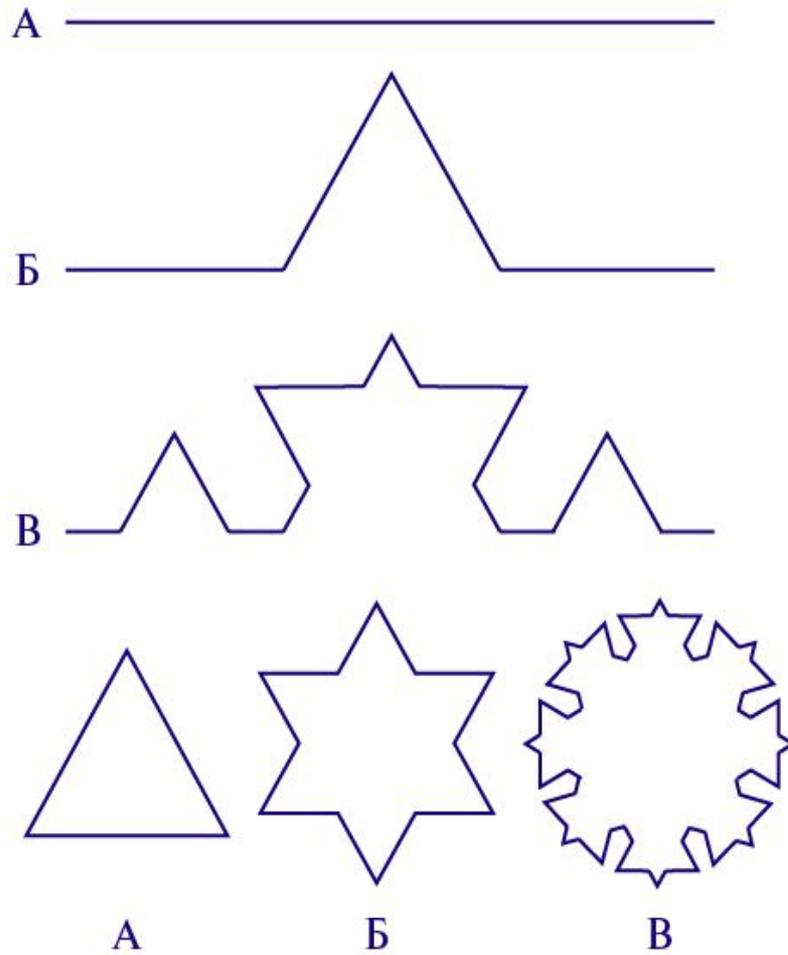


Рис. 7.16

К теории фракталов



$$D_N = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N}{\ln(1/r)}$$