Физика конденсированного состояния

Литература

Основная

1. **Крюков А.П.** Элементы физической кинетики: учебное пособие. М.: МЭИ, 1995.
2. **Крюков А.П.** Элементы гидродинамики и теплопереноса в гелии II: учебное пособие. М.: МЭИ, 2004.
3. **Дмитриев А.С.** Основы криофизики конденсированных систем: учебное пособие. М.: МЭИ, 2006.
4. **Королев П.В., Крюков А.П.** Методы описания конденсированных систем. Учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2010.

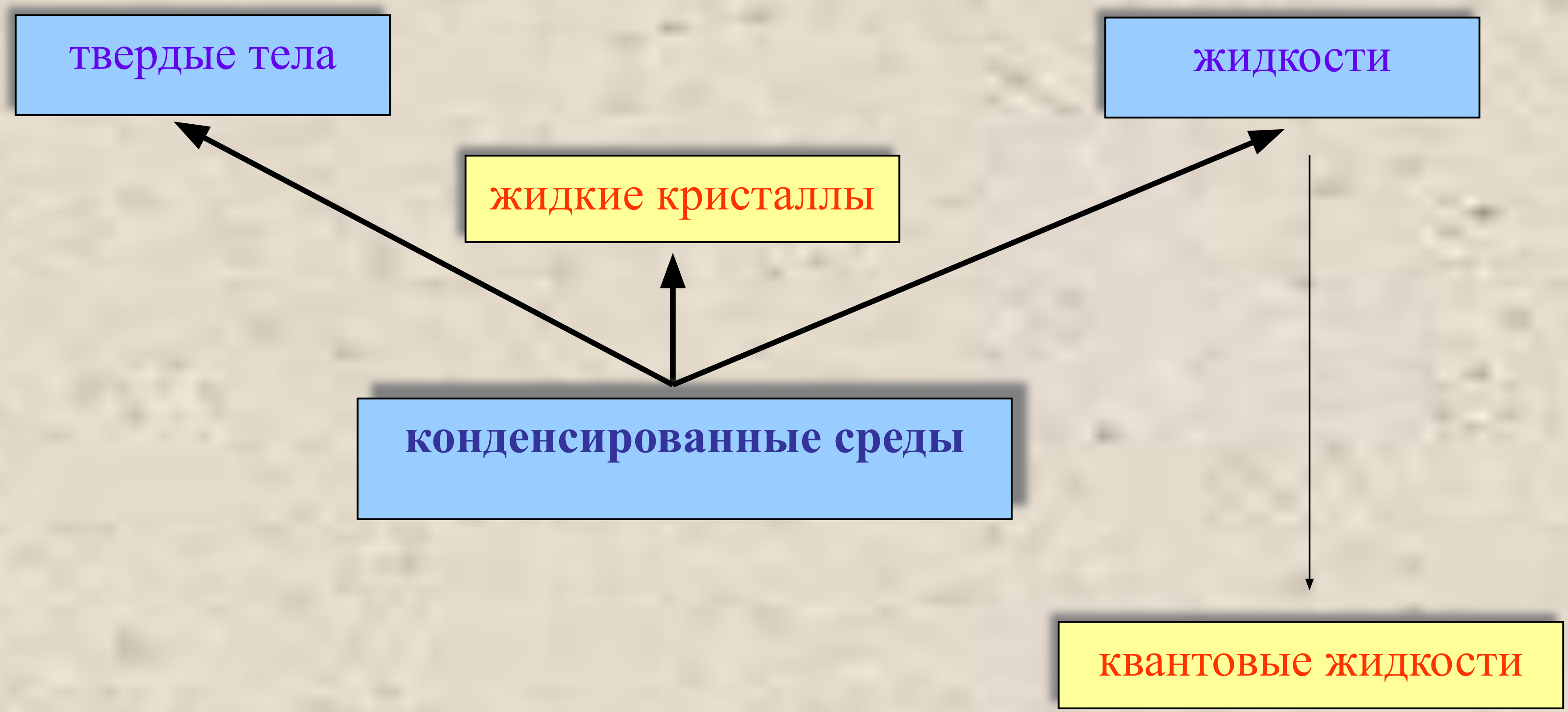
Физика конденсированного состояния

Литература

Дополнительная

1. **Коган М.Н.** Динамика разреженного газа. М.: Наука, 1967.
2. **Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.** Физическая кинетика. Сер. Теоретическая физика. Т.10. М.: Наука, 1979
3. **Аристов В. В. , Черемисин Ф.Г.** Прямое численное решение кинетического уравнения Больцмана. М.: ВЦ РАН, 1992.
4. **Крюков А.П., Левашов В.Ю., Шишкова И.Н., Ястребов А.К.** Численное решение кинетического уравнения Больцмана в инженерной практике: учебное пособие. М.: МЭИ, 2005.
5. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика.** Сер. Теоретическая физика. Т.6. М.: Наука, 1988.
6. **Матвеев А.Н.** Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1981.
7. **Паттерман С. Халатников И.М.** Теория сверхтекучести. М.: Наука, 1971.Гидродинамика сверхтекучей жидкости. М.: Мир, 1978.
8. **Киттель Ч.** Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
9. **Займан Дж.** Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.

Физика конденсированного состояния



Физика конденсированного состояния (ФКС)

Занимается фундаментальным изучением различных конденсатов.

Предмет ФКС – свойства конденсированных сред и процессы в них.

Лауреаты Нобелевской премии в области физики низких температур

Имя	Год открытия	Год награждения
Ландау Л.Д.	1941	1962
Капица П.Л.	1938 (39)	1978
Ли Д., Ошерофф Д., Ричардсон Р.	1972	1996
Беднорц Г., Мюллер А.	1986	1987
Корнелл Э., Вайман К., Кеттерли В.	1995	2001
Абрикосов А.А., Гинзбург В.Л., Леггетт А.Дж.	1957	2003

Физика конденсированного состояния

Конденсированная среда – система частиц, сильно взаимодействующих друг с другом.

Физика конденсированного состояния

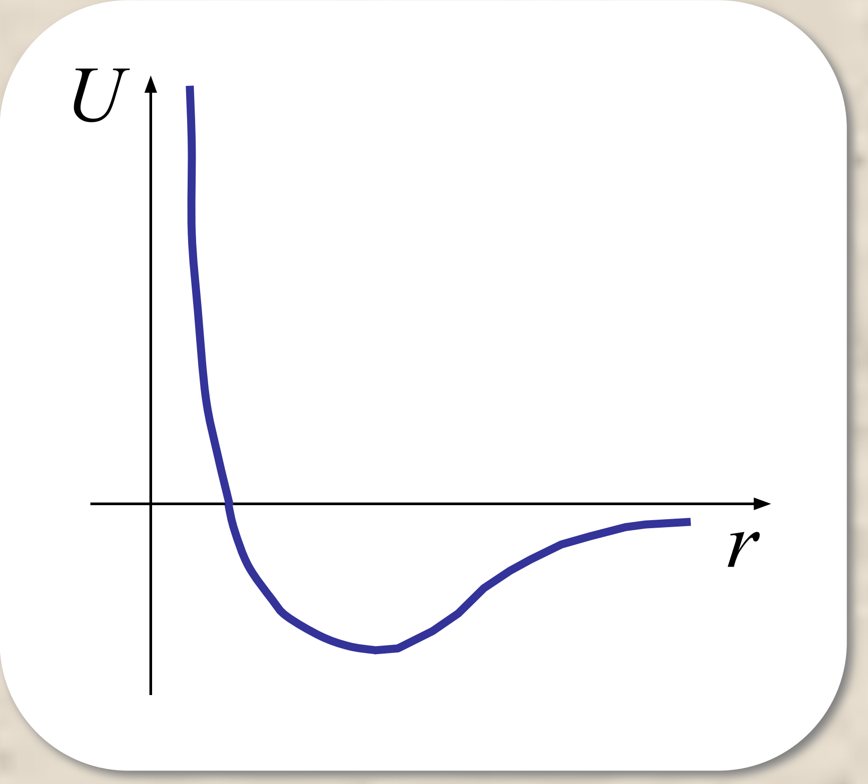
Состояния вещества

	Газ	Жидкость	Твердое тело
Порядок	Хаос	Ближний	Ближний и дальний
Время	$\tau_{ст} \sim 10^{-13}$c $\tau_{мс} \sim 10^{-9}$c	10^{-8}c	10^{-13}c
Энергия	$U_{ср} \ll E_{ср}$	$U_{ср} \sim E_{ср}$	$U_{ср} > E_{ср}$

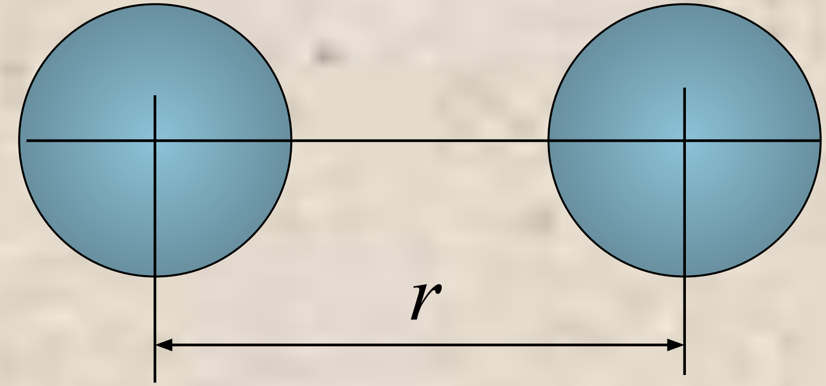
Основные понятия и определения

физическая кинетика -

микроскопическая теория процессов в статистически неравновесных системах



$$U = f(r)$$

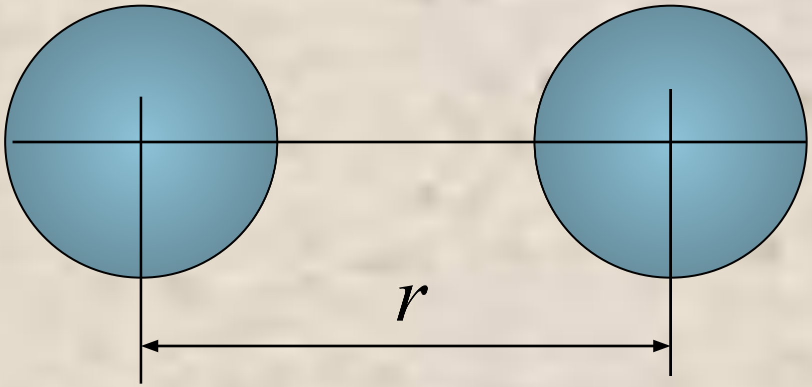


физическая кинетика

МОДЕЛЬ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА:

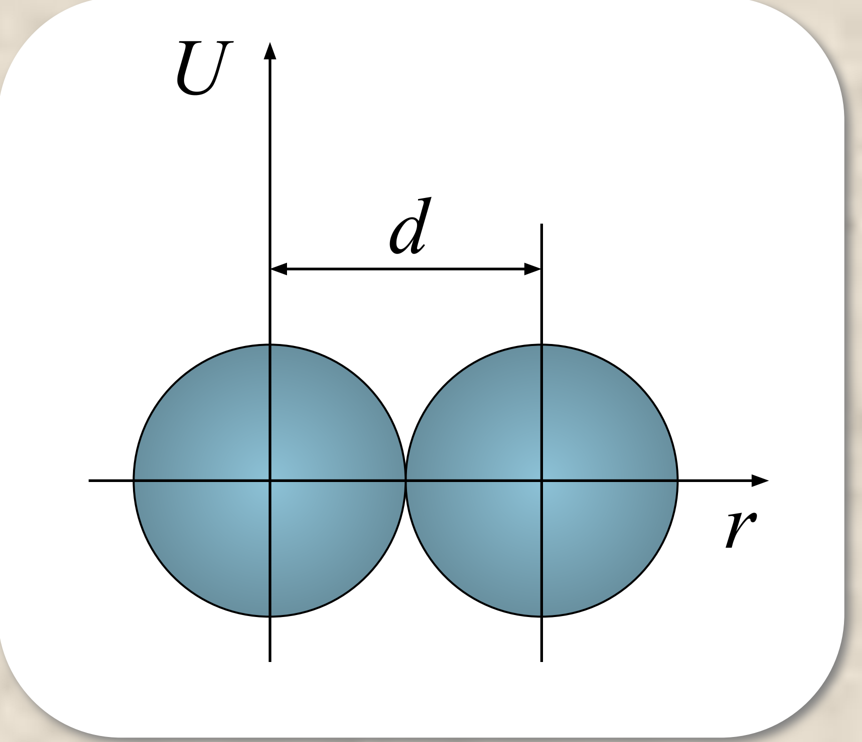
$$\bar{U}_{потенц.} << \bar{E}_{кинетич.}$$

$$U = f(r)$$



Потенциалы взаимодействия молекул

ТВЕРДЫЕ УПРУГИЕ ШАРЫ

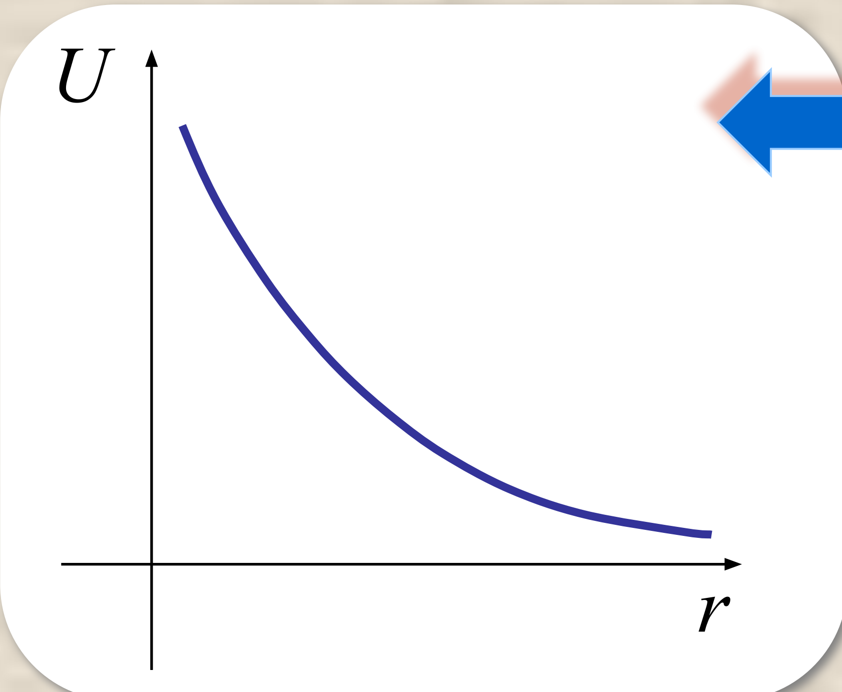


$$U = f(r)$$

$$\left.\begin{array}{l} U \to \infty \;\; при \;\; r = d \\ U = 0 \;\; при \;\; r > d \end{array}\right. \qquad (1)$$

Потенциалы взаимодействия молекул

ЦЕНТРЫ ОТТАЛКИВАНИЯ



$$U = \frac{K}{r^{s-1}} \qquad (2)$$

$$F = -\frac{\partial U}{\partial r} = \frac{K(s-1)}{r^{s}}$$

K, s – постоянные

Максвелловские молекулы **s = 5**

$$F = \frac{4K}{r^{5}} = \frac{K_1}{r^{5}} \qquad (2a)$$

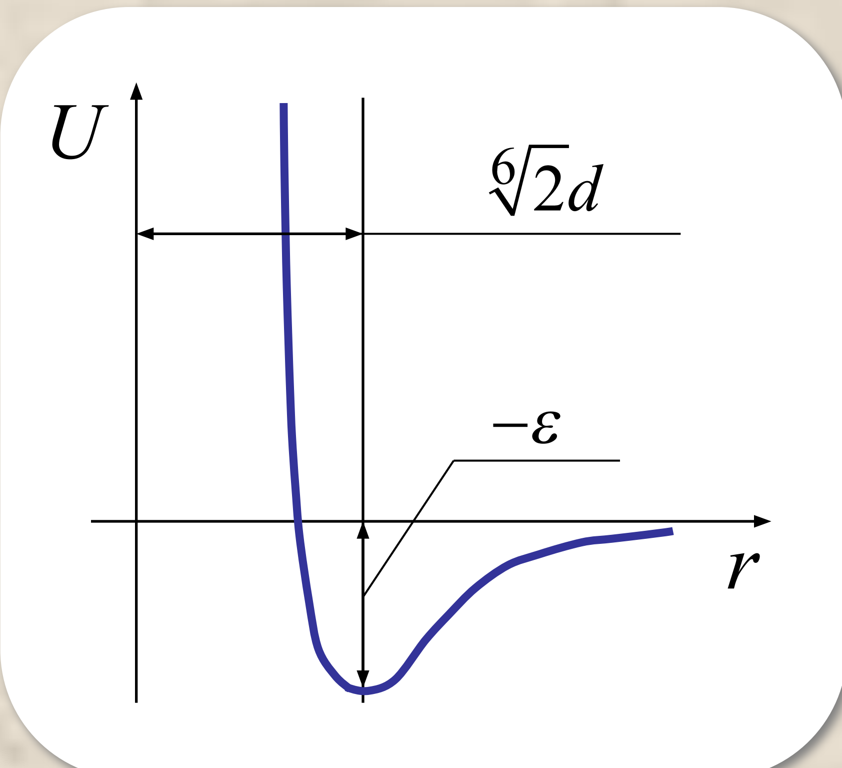
Потенциалы взаимодействия молекул

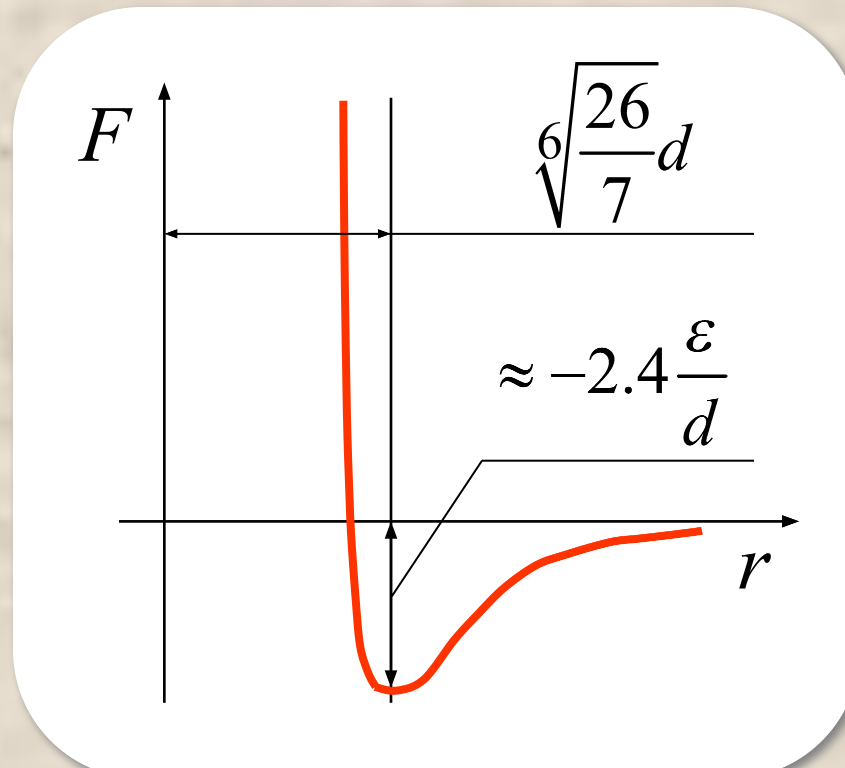
ЛЕННАРД-ДЖОНСА

$(d/r)^6$ притяжение

$(d/r)^{12}$ отталкивание

$$(3)\ U = 4\varepsilon\left\{\boxed{(d/r)^{12}} - \boxed{(d/r)^{6}}\right\}$$

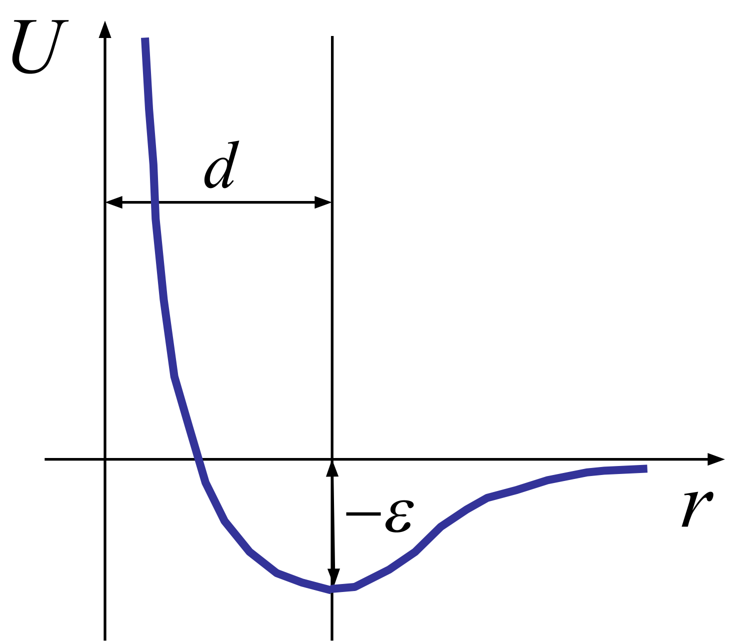




Потенциалы взаимодействия молекул

МОРЗЕ

$$U = \varepsilon\left\{\boxed{e^{-2a(r-d)}} - \boxed{2e^{-a(r-d)}}\right\} \qquad (4)$$



ε, d, a — постоянные

$$a \cdot d \cong 6$$

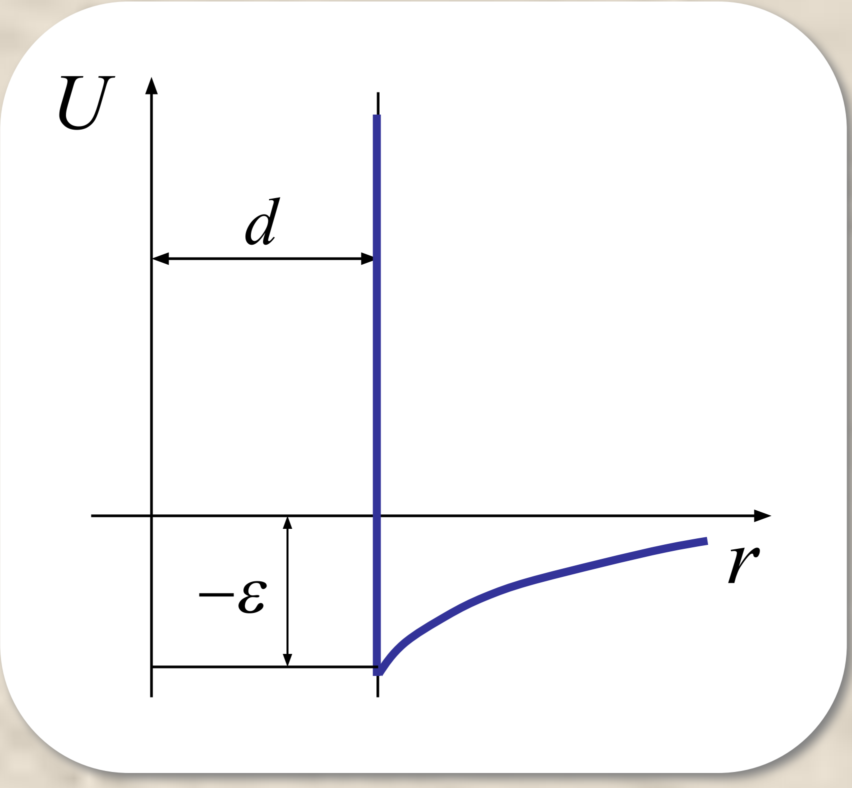
$2e^{-a(r-d)}$ — притяжение

$e^{-2a(r-d)}$ — отталкивание

Потенциалы взаимодействия молекул

СЕЗЕРЛЕНДА

$$U = f(r)$$



$U \to \infty$ при r d $=$

$$U = -\varepsilon\left(d/r\right)^m \qquad (5)$$

при $r > d$

ε, d, m – постоянные

функция распределения

(6) $f\left(\vec{x},\vec{\xi},t\right)d\vec{x}d\vec{\xi}$ – **есть ожидаемое число молекул в объеме $d\vec{x}d\vec{\xi}$, координаты которых находятся в интервале от $\vec{x}$ до $\vec{x}+d\vec{x}$, а скорости в интервале от $\vec{\xi}$ до $\vec{\xi}+d\vec{\xi}$.**

$f\left(\vec{x},\vec{\xi},t\right)$ – **функция семи переменных:**

$x, y, z, \xi_x, \xi_y, \xi_z, t.$

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

РАВНОВЕСНОЕ МАКСВЕЛЛОВСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

$$f = n\left(\frac{1}{2\pi RT}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{\left(\xi_x^2+\xi_y^2+\xi_z^2\right)}{2RT}\right], \qquad (7)$$

n – числовая плотность;

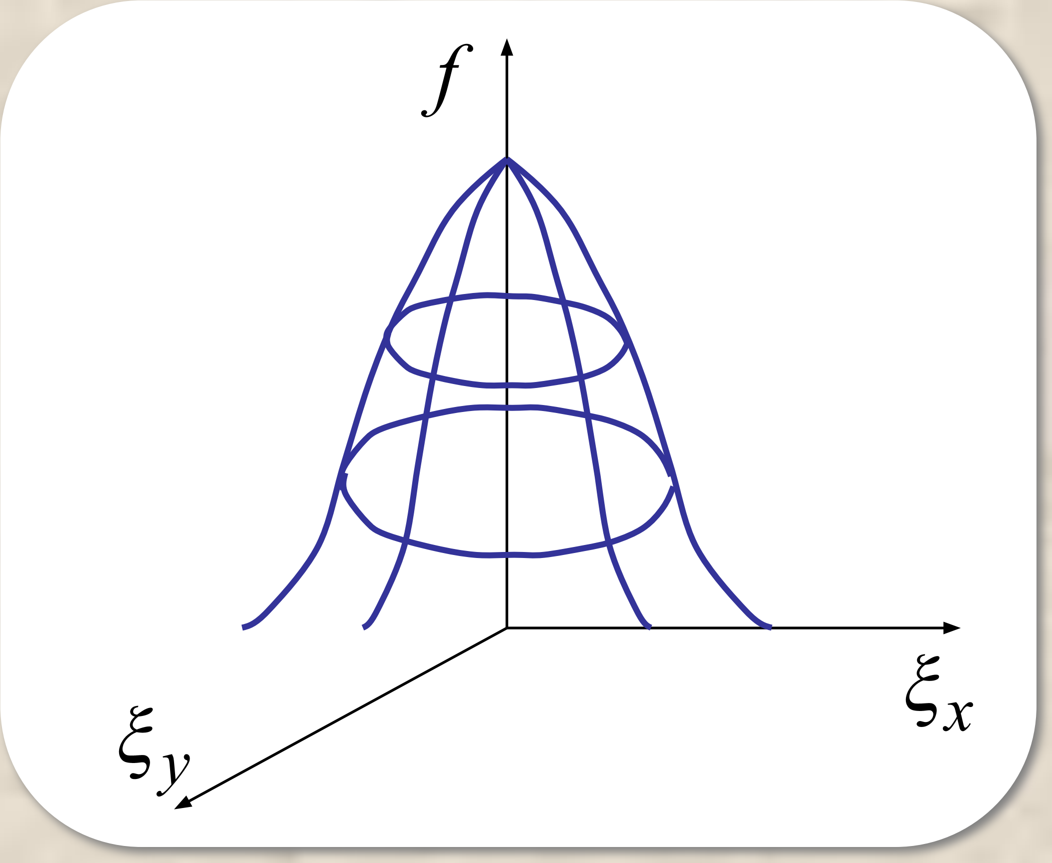
T – температура;

R – индивидуальная газовая постоянная.

функция распределения

СЕЧЕНИЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОСКОСТЬЮ

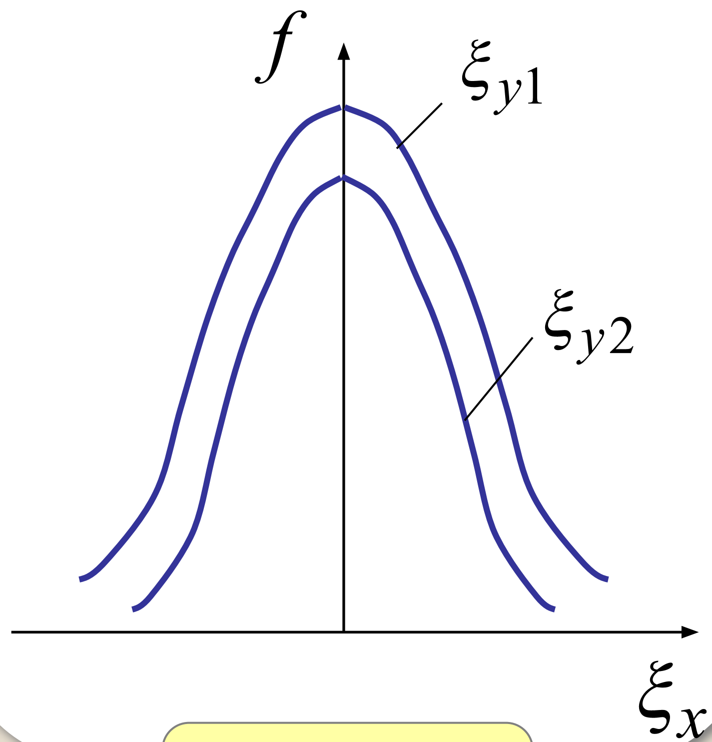
$$\xi_z = 0$$



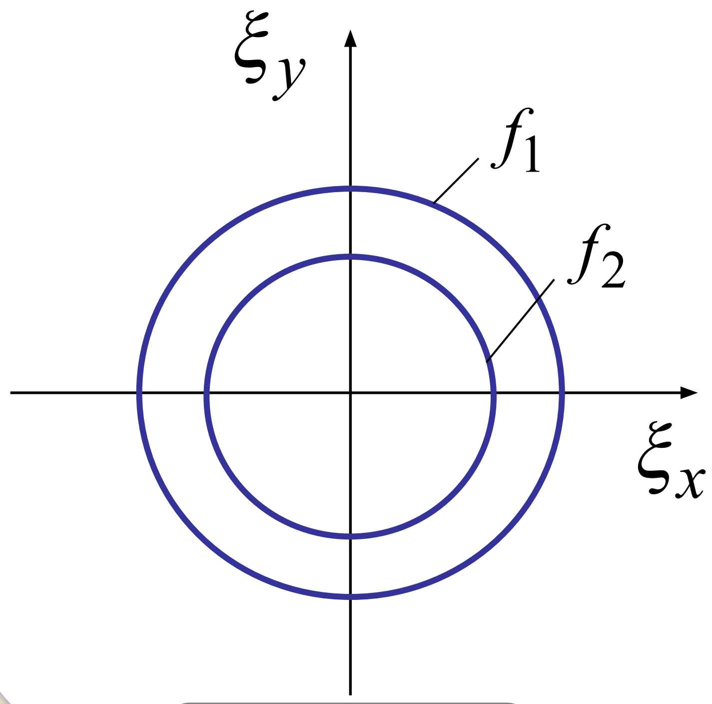
функция распределения

СЕЧЕНИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОСКОСТЯМИ

$\xi_z = 0, \xi_{y1} = const, \xi_{y2} = const:$ $\xi_z = 0, f_1 = const, f_2 = const:$



$\xi_{y2} > \xi_{y1}$



$f_2 > f_1$

Моменты функции распределения

Момент функции распределения –
это интеграл по пространству скоростей
от этой функции, взятый с определенным весом.

$$M(\varphi f) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\vec{\xi}) f \, d\vec{\xi} \qquad (8)$$

$\varphi(\vec{\xi})$ – *некоторая функция* $\vec{\xi}$

Моменты функции распределения

ПРИМЕРЫ МОМЕНТОВ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

$$\rho = m \int_{-\infty}^{\infty} f \, d\vec{\xi} \; ; \qquad (9)$$

ρ – *плотность газа*; m – *масса молекулы*

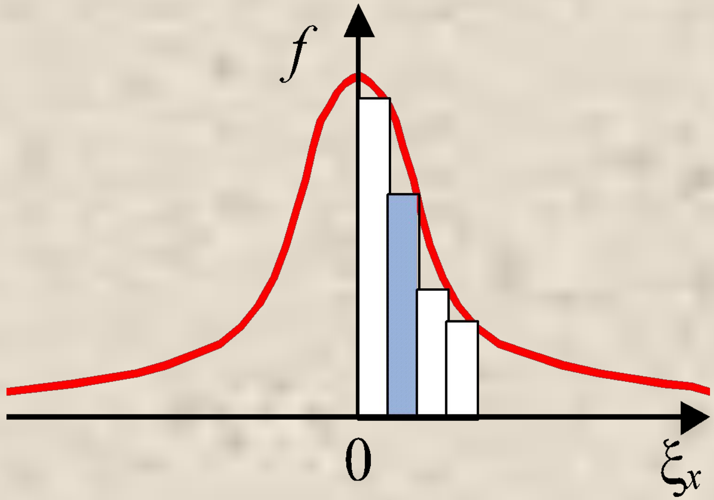
$$j_x = \rho u_x = m \int_{-\infty}^{\infty} f \xi_x \, d\vec{\xi} \qquad (10)$$

j_x – *x-ая проекция плотности потока массы* ;

u_x – *x-ая проекция скорости потока газа* ;

Моменты функции распределения

$f(t, \vec{x}, \vec{\xi})\, d\vec{x}\, d\vec{\xi}$ ожидаемое число молекул в элементе объема физического пространства $d\vec{x}$ около точки $\vec{x}$, обладающих скоростями в элементе пространства скоростей $d\vec{\xi}$ около точки $\vec{\xi}$



$$f(t, \vec{x}, \vec{\xi})\, d\vec{\xi}$$ – для единичного объема

$$\rho = m \int \int_{-\infty}^{\infty} \int f d\vec{\xi}$$

$$\rho = m \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(t, \vec{x}, \vec{\xi})\, d\xi_x\, d\xi_y\, d\xi_z$$

<u>Другие моменты</u>

$$\rho u_x = m \int \int_{-\infty}^{\infty} \int f \xi_x d\vec{\xi}; \quad T = \frac{m}{3R\rho} \int \int_{-\infty}^{\infty} \int (\vec{\xi} - \vec{u})^2 f d\vec{\xi}$$

Моменты функции распределения

ПРИМЕРЫ МОМЕНТОВ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

$$\Pi_{kl} = \boxed{m \int_{-\infty}^{\infty} \xi_k \xi_l f \, d\vec{\xi}\,;} \qquad (11)$$

$$\boxed{E_x = \frac{m}{2} \int_{-\infty}^{\infty} f \vec{\xi}^{\,2} \xi_x \, d\vec{\xi}} \qquad (12)$$

$$\vec{\xi}^{\,2} = \xi_x^{\,2} + \xi_y^{\,2} + \xi_z^{\,2}$$

Моменты функции распределения

$$P_{xy} = m \int\limits_{-\infty}^{\infty} c_x c_y f \, d\vec{\xi} \, ; \qquad (13)$$

$$c_x = \xi_x - u_x , \qquad c_y = \xi_y - u_y$$

u_x – проекция скорости потока газа ;

u_y – проекция скорости потока газа ;

$$q_x = \frac{1}{2} m \int\limits_{-\infty}^{\infty} \vec{c}^{\,2} c_x f \, d\vec{\xi} \qquad (14)$$

$$\frac{3}{2} kTn = \frac{1}{2} m \int\limits_{-\infty}^{\infty} \vec{c}^{\,2} f \, d\vec{\xi} \qquad (15)$$

$$\vec{c}^{\,2} = c_x^{\,2} + c_y^{\,2} + c_z^{\,2}$$