

# ЛЕКЦИЯ № 15.

## Физическая кинетика Явления переноса

## ВОПРОСЫ

43. Средняя длина свободного пробега молекул. Эффективный диаметр молекулы. Среднее число соударений в единицу времени.

44. Явления переноса – диффузия, теплопроводность и вязкость в газах.

Коэффициенты диффузии, теплопроводности, вязкости.

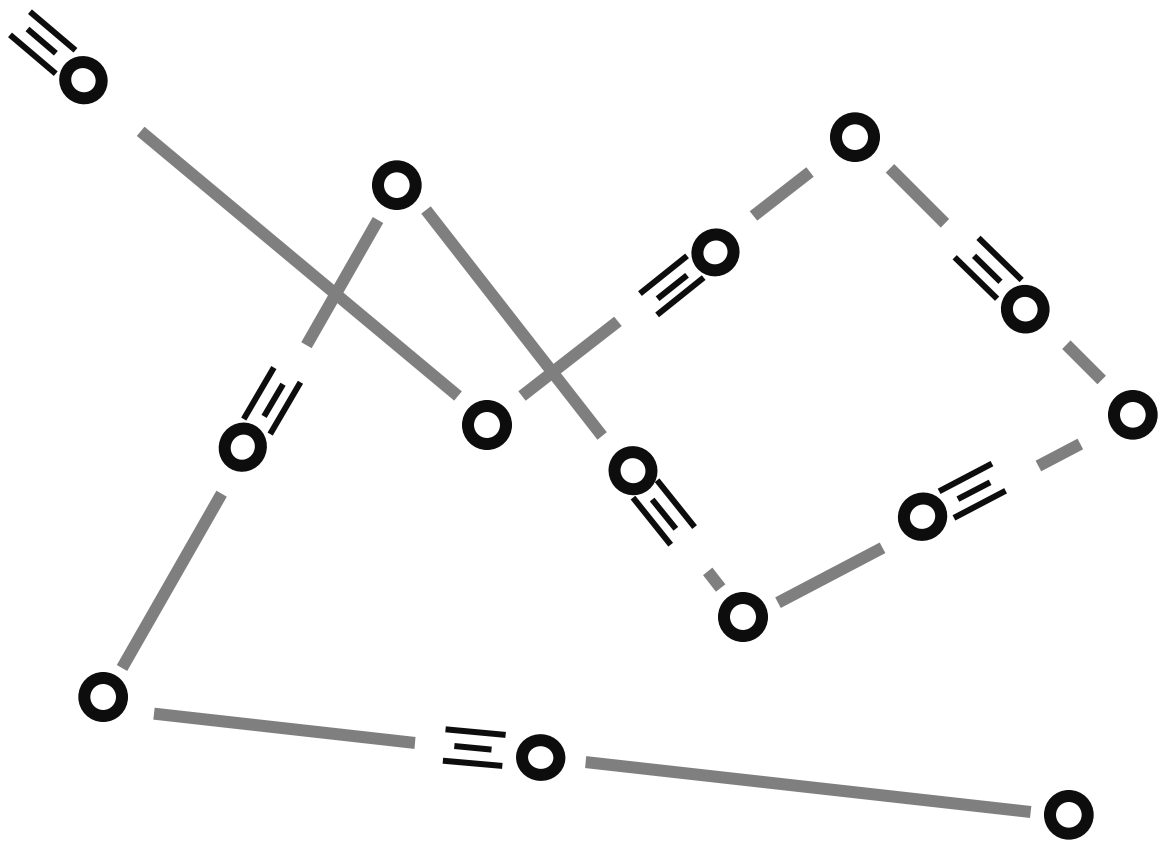
43. Средняя длина свободного пробега молекул. Эффективный диаметр молекулы. Среднее число соударений в единицу времени.

Микроскопическую теорию процессов, происходящих в неравновесных системах, называют физической кинетикой.

Физическая кинетика использует представления об атомно-молекулярном строении веществ.

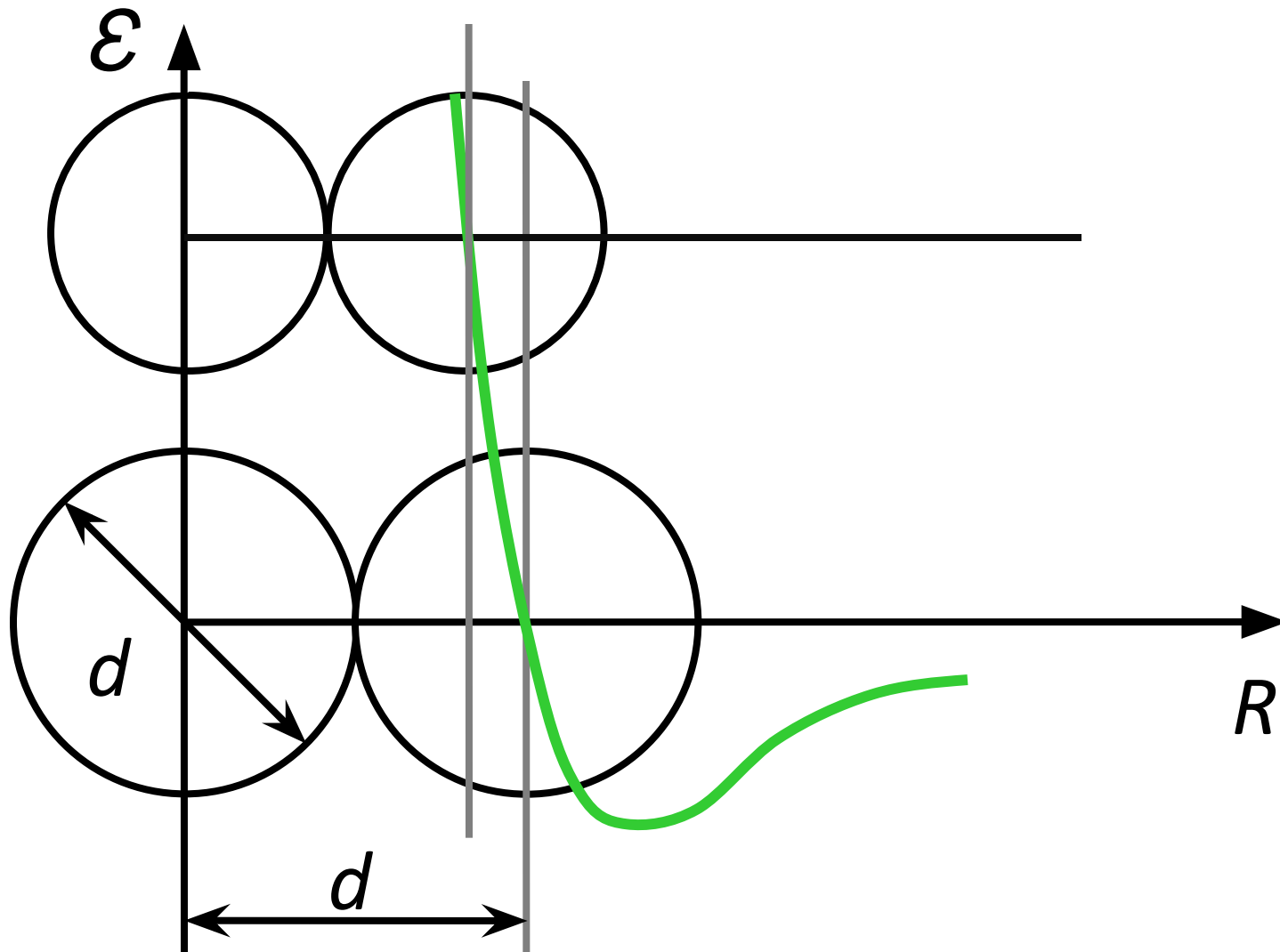
Она изучает процессы переноса массы вещества, импульса, энергии, заряда и т. д. в различных физических системах (газах, жидкостях, твердых телах, плазме) и влияние на них внешних полей.

Молекулы реальных газов хотя и малы, имеют конечные размеры и, находясь в состоянии непрерывного хаотического теплового движения, неизбежно сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда.



Под столкновением двух молекул не будем понимать столкновение двух абсолютно упругих шаров. Рассмотрим процесс столкновения двух молекул с помощью зависимости энергии их взаимодействия от расстояния между их центрами.





$d$  – диаметр молекулы или  
эффективный диаметр.

$\sigma = \pi d^2$  – эффективное сечение  
молекулы.

Если молекула движется со средней  
скоростью  $u_{\text{ср}}$  и претерпевает в  
среднем  $\nu$  столкновений за секунду,  
то средняя длина свободного  
пробега будет равна

$$\lambda = \frac{u_{\text{ср}}}{\nu} = \frac{\langle u \rangle}{\nu}$$

Предположим, что все молекулы, кроме одной покоятся. Двигающаяся молекула изменяет своё направление, если центр неподвижной молекулы находится на расстоянии меньшем эффективного диаметра от линии движения.

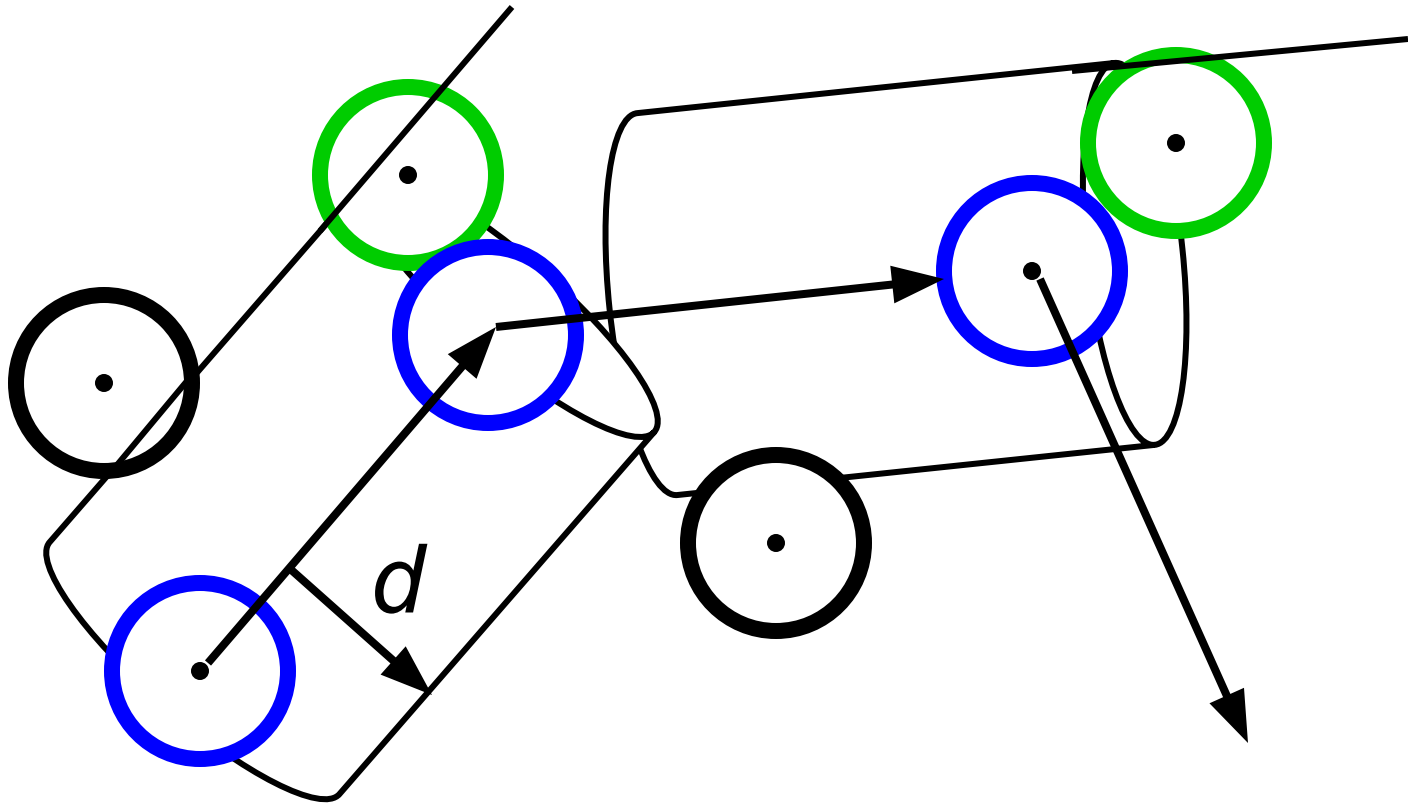
Таким образом, число столкновений за 1 секунду равно числу молекул, центры которых попали в объём

$$V = \sigma v_{\text{ср}} = \pi d^2 v_{\text{ср}},$$

ТО ЕСТЬ

$$v' = \pi d^2 v_{\text{ср}} n,$$

$n$  – концентрация.



Столкновение происходит тогда, когда расстояние между центрами молекул становится меньше диаметра молекулы  $d$ . Иными словами, при движении молекула описывает некоторый цилиндр, площадь основания которого равняется эффективному сечению  $\sigma = \pi d^2$ , а ось совпадает с вектором скорости молекулы.

Учёт движения всех молекул даст поправку в виде сомножителя  $\sqrt{2}$ :

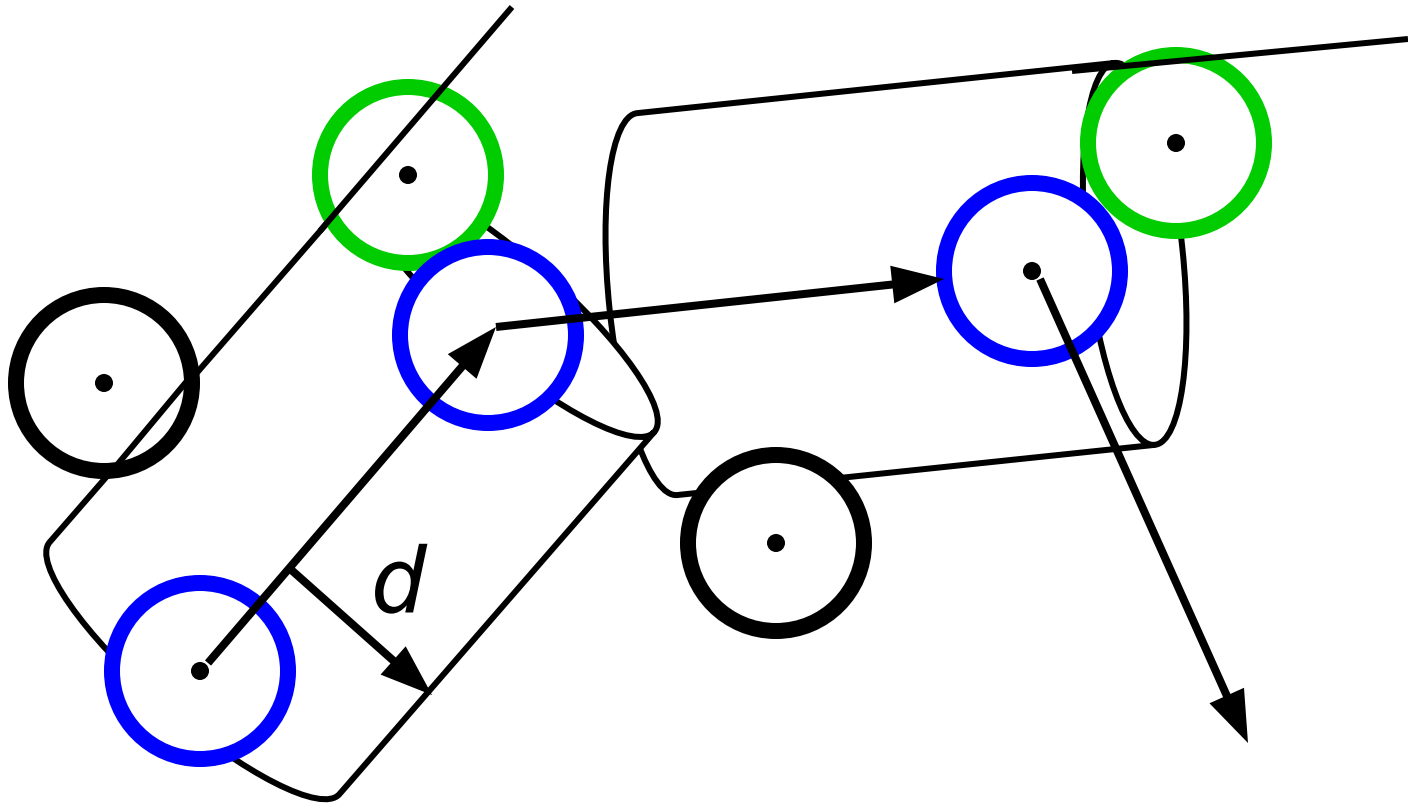
$$v = \sqrt{2}\pi d^2 v_{\text{ср}} n.$$

Отсюда получаем

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$$

Длина свободного пробега –  
расстояние, которое проходит  
молекула между двумя  
последовательными соударениями.





Связь длины свободного пробега с коэффициентами.

Коэффициент диффузии

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \lambda$$

Коэффициент теплопроводности

$$k = \frac{1}{3} \langle v \rangle \lambda \rho C_V^{\text{уд}} = \frac{1}{3} \langle v \rangle \lambda C_V^{\text{об}}$$

Коэффициент вязкости

$$\eta = \frac{1}{3} \langle v \rangle \lambda \rho$$

Здесь  $\rho$  – плотность газа,  
 $C_V^{об}$  – теплоёмкость газа при  
постоянном объёме на единицу  
объёма,  
 $C_V^{уд}$  – теплоёмкость газа при  
постоянном объёме на единицу  
массы.



44. Явления переноса – диффузия, теплопроводность и вязкость в газах. Молекулярный механизм процессов переноса. Коэффициенты диффузии, теплопроводности, вязкости; связь между ними.

В случае нарушения равновесия  
возникают потоки либо молекул,  
либо теплоты и т.п. Этими  
процессами занимается физическая  
кинетика.

**Диффузия – самопроизвольное  
выравнивание концентраций в смеси  
нескольких различных веществ,  
обусловленное тепловым движением  
молекул.**

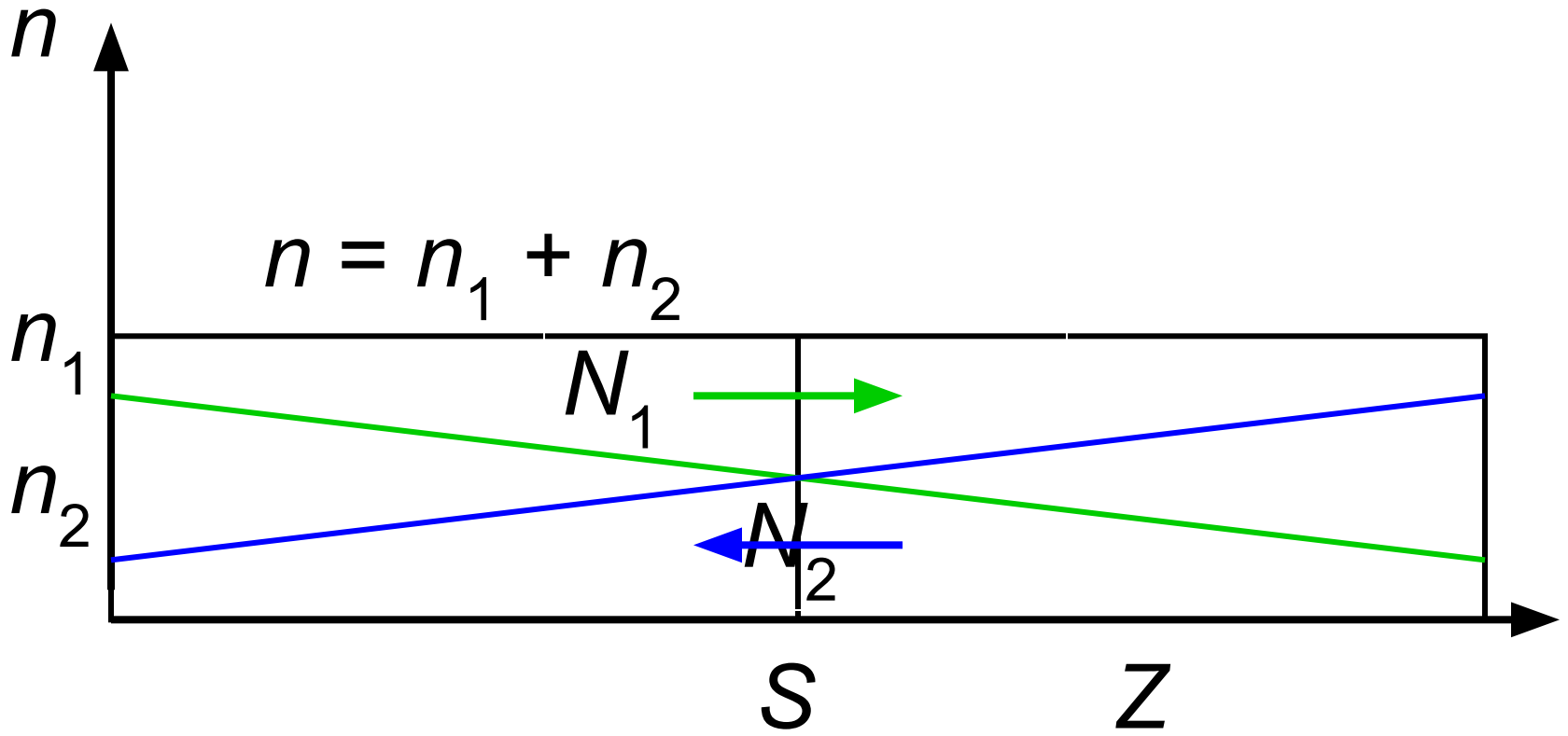
Рассмотрим сосуд, содержащий газ из двух компонент:  $n_1$  – концентрация молекул одного вида,  $n_2$  – концентрация молекул другого вида. Полное число молекул на единицу объёма  $n = n_1 + n_2$ .



Предположим, что молекулы разных газов распределены неравномерно, но  $n = \text{const}$ , и как следствие  $p = nkT = \text{const}$ . Поэтому потоки не возникают, но переносятся компоненты, поскольку имеются градиенты концентрации компонент, равные друг другу

$$\frac{dn}{dz} = 0, \quad \frac{dn_1}{dz} = -\frac{dn_2}{dz}, \quad \frac{dn_1}{dz} + \frac{dn_2}{dz} = 0.$$

Сосуд длинный и узкий. На рисунке верхний край сосуда совпадает с величиной « $n$ ».  $S$  – поперечное сечение сосуда.  $N_1$  и  $N_2$  – число молекул первого и второго типа, переносимых в сторону меньшей концентрации данного вещества (этому соответствует знак минус в формуле).



Это явление описывается законом  
Фика

$$N_i = -D \frac{dn_i}{dz} S$$

$N_i$  – число частиц переносимых за 1 секунду через поперечное сечение  $S$ .

$D$  – коэффициент пропорциональности – коэффициент диффузии (размерность –  $\text{м}^2/\text{с}$ ).

Теплопроводность – перенос тепла (тепловой энергии) от более горячего участка системы к более холодному (по направлению, противоположному градиенту температуры).

# Закон Фурье (одномерный и общий случай)

$$q = -k \frac{dT}{dz} S$$

$$q = -k \text{grad} T S = -k S \left( \frac{\partial T}{\partial x} i + \frac{\partial T}{\partial y} j + \frac{\partial T}{\partial z} k \right)$$

$k$  – коэффициент теплопроводности  
(размерность – Вт/м\*К)

Воспользуемся соотношением

$$q = \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (m C_V T) = \frac{\partial}{\partial t} ((S dz \rho) C_V dT)$$

и продифференцируем закон Фурье  
по координате dz:

$$\frac{\partial}{\partial t} ((dz S \rho) C_V T) = -k \frac{dT}{dz} S,$$

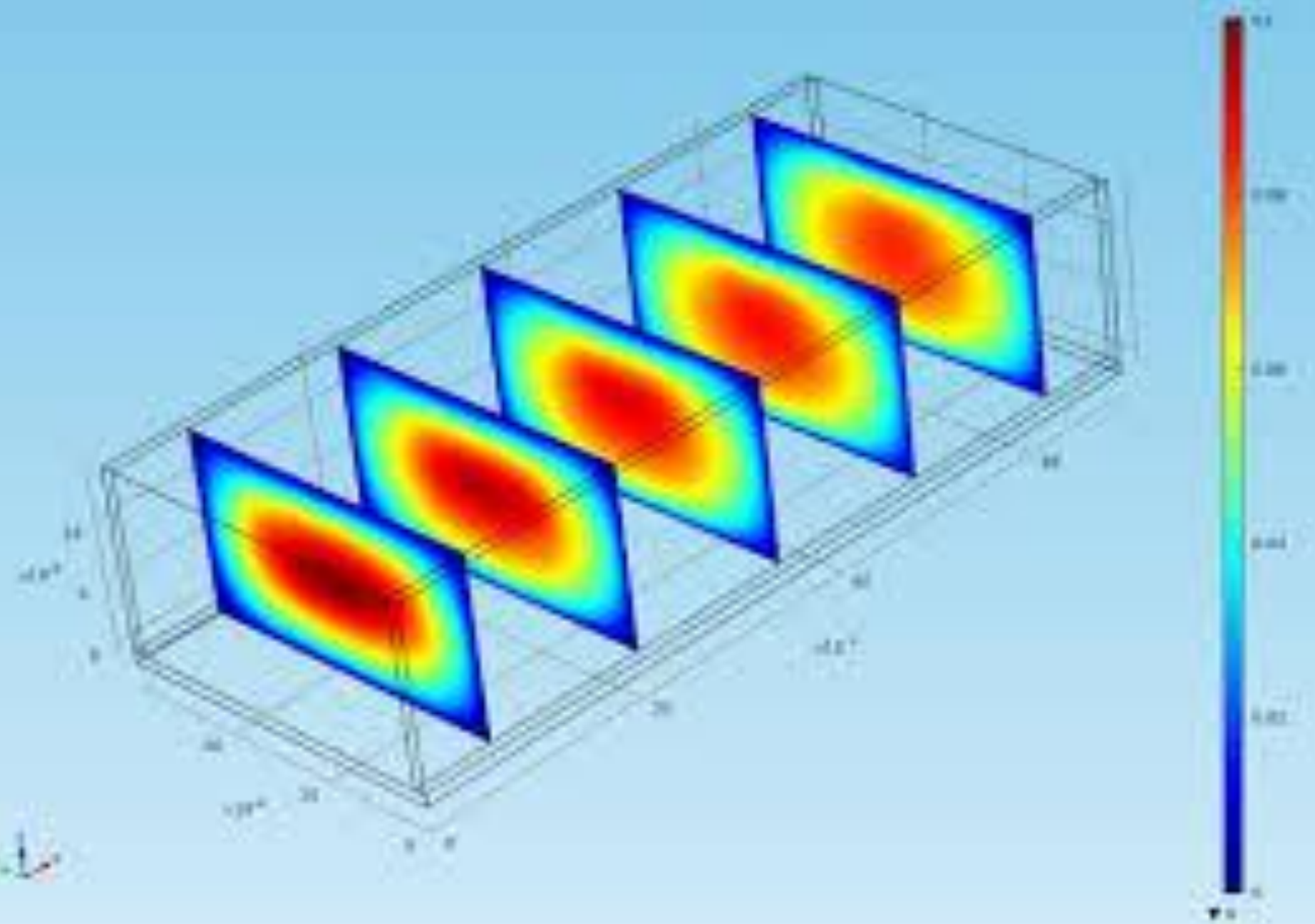
$$\frac{\partial}{\partial t} (T) = -\frac{k}{\rho C_V} \frac{d}{dz} \left( \frac{dT}{dz} \right),$$

В итоге получим уравнение температуропроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad \chi = \frac{k}{\rho C_V},$$

$\chi$  – коэффициент температуропроводности среды,  $\rho$  – плотность,  $C_V$  – удельная теплоёмкость при постоянном объёме.

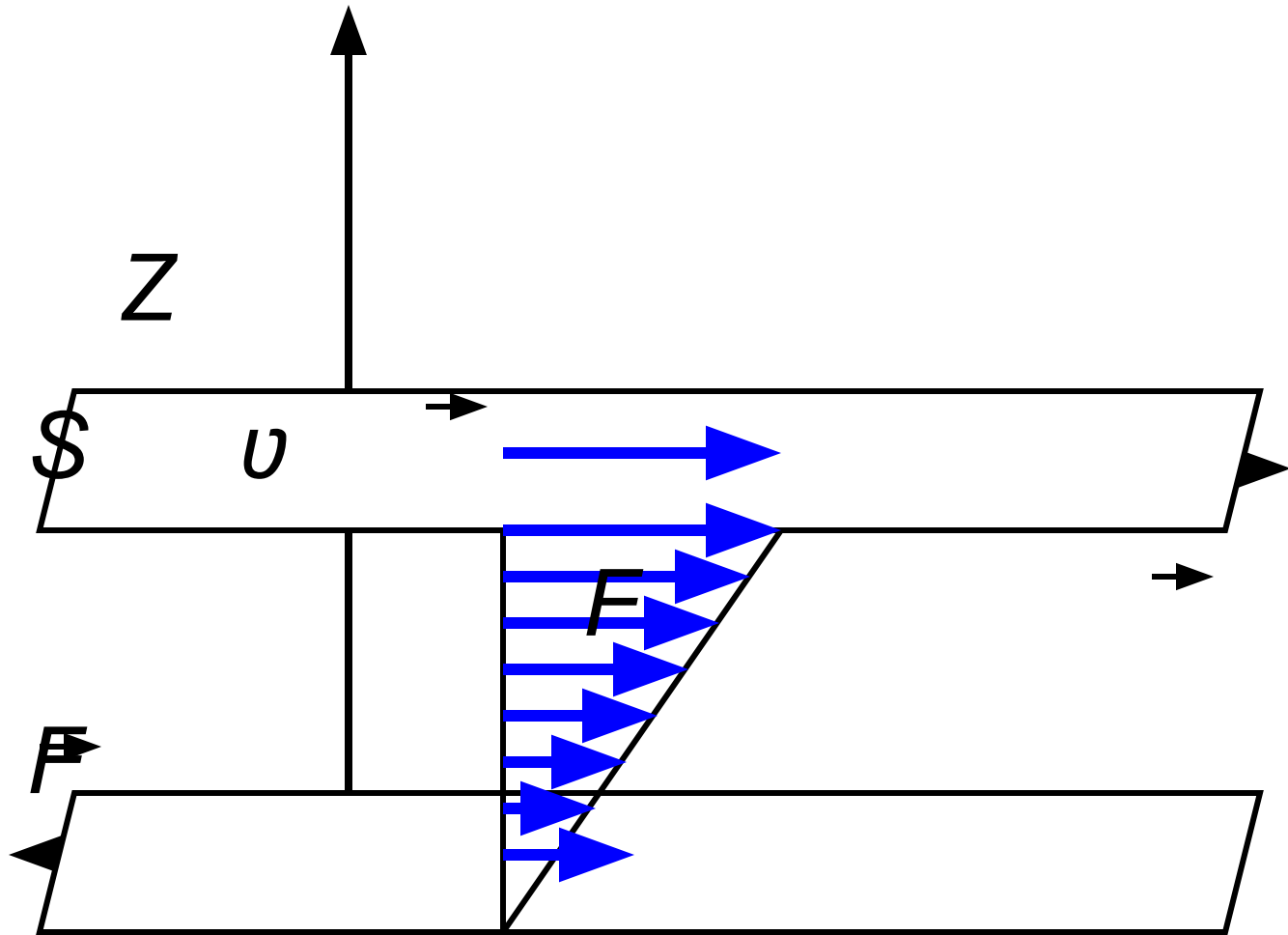




Вязкость (вязкое трение) – процесс переноса импульса в газе или жидкости от одного слоя к другому.

В жидкостях вязкость осуществляется непосредственным взаимодействием молекул между собой. Чем меньше подвижность молекул, тем выше коэффициент вязкости – с уменьшением температуры вязкость увеличивается.

Рассмотрим две параллельные пластины площадью  $S$ , одна неподвижна и прикреплена к динамометру, другая подвижна. Она движется со скоростью  $u$  по действию некоторой силы  $F$ . Динамометр у нижней пластины спустя некоторое время покажет усилие, действующее на неподвижную пластину, равное  $F$ .



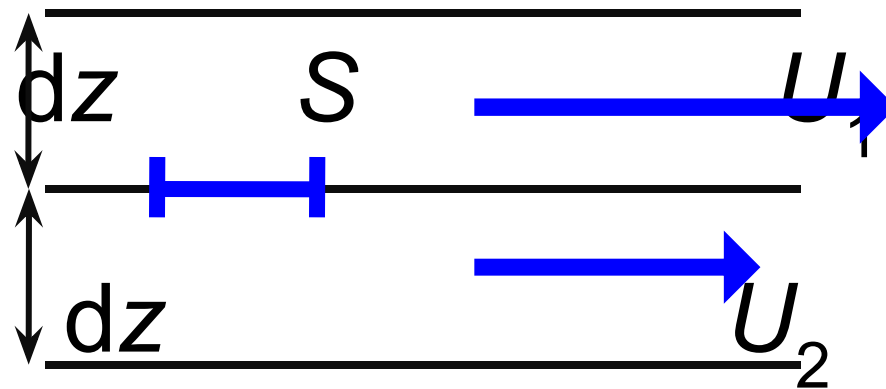
## Формула вязкого трения для газов

$$F = \eta \frac{dv}{dz} S$$

$\eta$  – коэффициент вязкости или внутреннего трения (размерность – Па\*с (СИ), Пуаз (СГС),  
1 Па\*с = 10 П).

В газах передача импульса происходит за счёт того, что молекулы перелетают из одного слоя в другой, с ростом температуры вязкость в газах увеличивается потому, что растёт скорость молекул и они более эффективно переходят из слоя в слой, передавая импульс.

Рассмотрим два слоя некоторого газа толщиной  $dz$ , скорость слоёв  $U_1$  и  $U_2$  и площадку  $S$  между слоями.



Пусть в какой-то момент времени слои обладают импульсами  $K_1$  и  $K_2$ . Они постоянно меняются, благодаря переходу молекул из одного слоя в другой. Число молекул, прошедших через площадку  $S$  за 1 секунду

$$N = \frac{1}{6} n \langle v \rangle S$$



В итоге, больший импульс уменьшается (он получает молекулы с меньшей упорядоченной скоростью), меньший – увеличивается.

Запишем импульс, который передаётся от одного слоя к другому через площадку  $S$  в единицу времени ( $m$  – масса молекулы)

$$K = N(mU_1 - mU_2)$$

Или

$$K = \frac{1}{6} n \langle v \rangle S m (U_1 - U_2)$$

Реально, скорость изменяется непрерывно, так как молекула пролетает расстояние  $\lambda$  от удара до удара, перепишем последнее уравнение

$$K = \frac{1}{6} n \langle v \rangle S m (U(z - \lambda) - U(z + \lambda)) = -\frac{1}{6} n \langle v \rangle S m \frac{dU}{dz} 2\lambda$$

$$K = \frac{1}{6} n \langle v \rangle S m (U(z - \lambda) - U(z + \lambda)) = -\frac{1}{6} n \langle v \rangle S m \frac{dU}{dz} 2\lambda$$

Перепишем следующим образом

$$nm = \rho,$$

$$K = -\left(\frac{1}{3} \langle v \rangle \lambda \rho\right) \frac{dU}{dz} S = -\eta \frac{dU}{dz} S,$$

$$\eta = \frac{1}{3} \langle v \rangle \lambda \rho$$

$\eta$  – коэффициент вязкости.



# ЛЕКЦИЯ № 16.

## Элементы физической кинетики

## ВОПРОСЫ

45. Броуновское движение.

46. Элементы неравновесной термодинамики. Кинетические коэффициенты. Теорема Онсагера.

# 45. Броуновское движение.

# Термодинамика неравновесных процессов

Классическая термодинамика даёт полное количественное описание равновесных (обратимых) процессов. Для неравновесных процессов она устанавливает лишь неравенства, которые указывают возможное направление этих процессов.



Задача термодинамики  
неравновесных процессов –  
количественное изучение  
неравновесных процессов для  
состояний, несильно отличающихся  
от равновесного, в частности  
определение скоростей  
неравновесных процессов в  
зависимости от внешних условий.

Здесь применяют следующий метод: систему представляют состоящей из элементарных объёмов, которые всё же настолько велики, что содержат большое число частиц.

Рассматривают следующие  
равновесия:

Неполное равновесие – параметры  
системы, характеризующие  
состояние системы, очень слабо  
зависят от времени.

Локальное равновесие – равновесие в элементарных объёмах среды, можно характеризовать температурой, химическим потенциалом и другими термодинамическими параметрами, но не постоянными, а зависящими от координат и времени.

При локальном термодинамическом  
равновесии элементов среды  
состояние среды в целом  
неравновесно.

На основе локального равновесия в  
физической кинетике получают  
уравнения диффузии,  
теплопроводности.

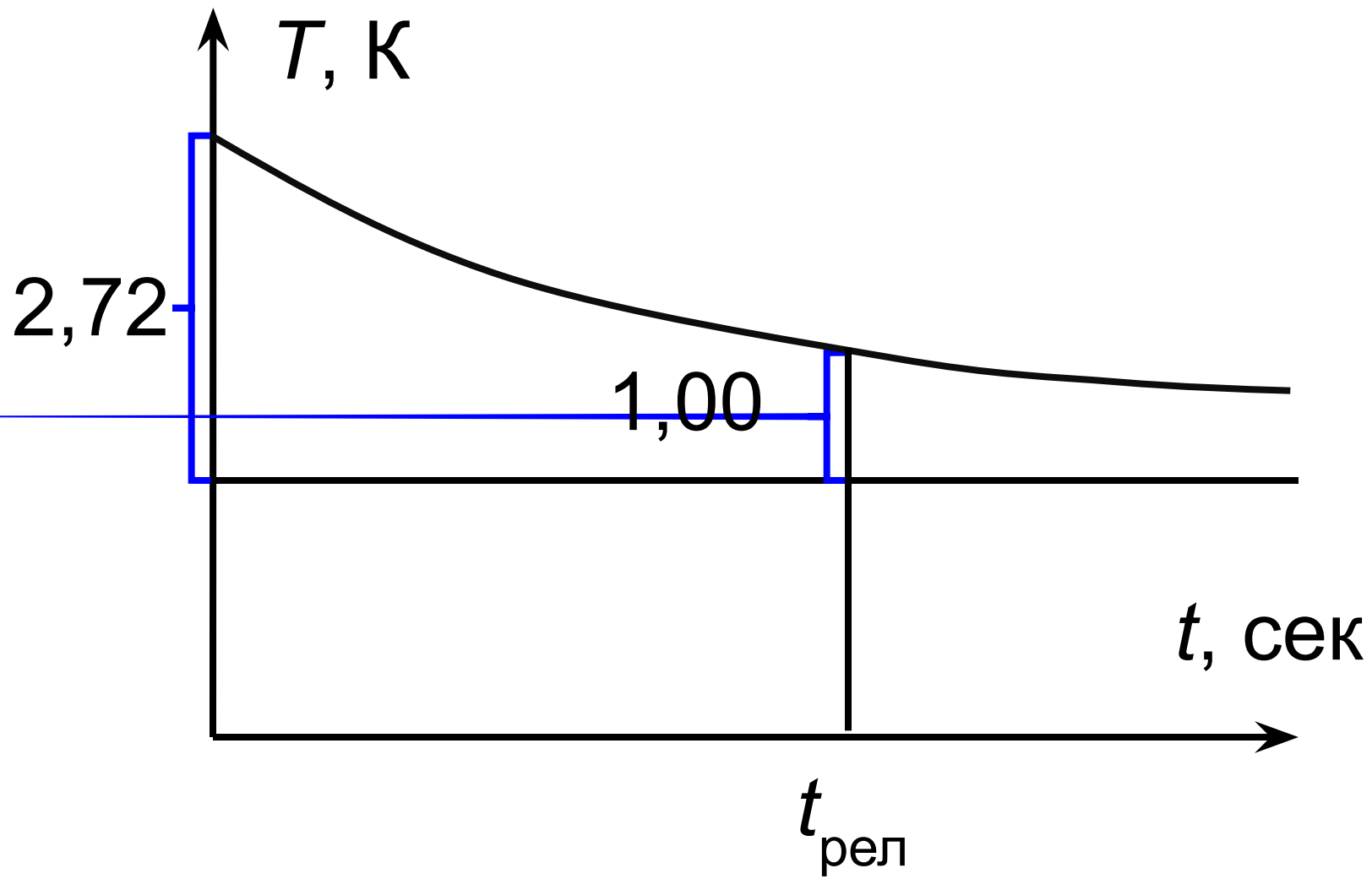
# Время релаксации

Релаксационные явления:  
равномерное распределение по всей  
макросистеме температуры,  
давления, концентрации,  
установление ламинарного течения  
или полное прекращение движения  
слоёв жидкости относительно друг  
друга.

Время релаксации – время, за которое первоначальное отклонение какой-либо величины от равновесного значения уменьшается в «e» раз.

Пример: пусть в теплоизолированном поршне (цилиндрический сосуд) создадим в некотором месте скачок давления, что приведёт к возрастанию температуры в этой области, допустим на  $2,72 \text{ K}$ .  
временем релаксации здесь будет время, за которое эта разность температур уменьшится в « $e$ » раз и станет равной  $1,00 \text{ K}$ .





Броуновское движение –  
хаотическое движение взвешенных  
микрочастиц в газах или жидкостях.

Теорию движения броуновских  
частиц разработали А. Эйнштейн и  
М. Смолуховский.

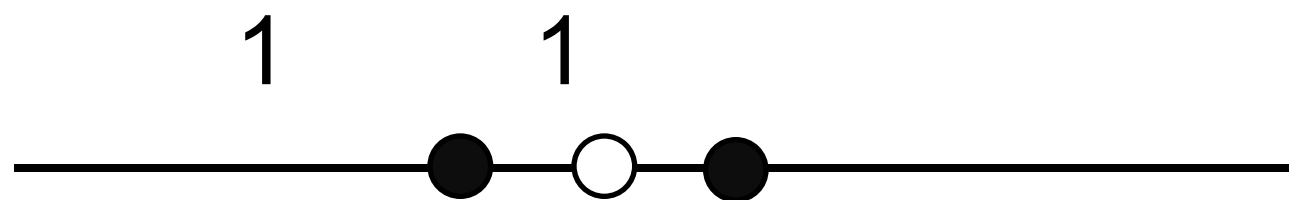
Модель: Блуждание «абсолютно  
пьяного человек».

Каждый раз человек смещается на 1  
шаг вправо или влево.

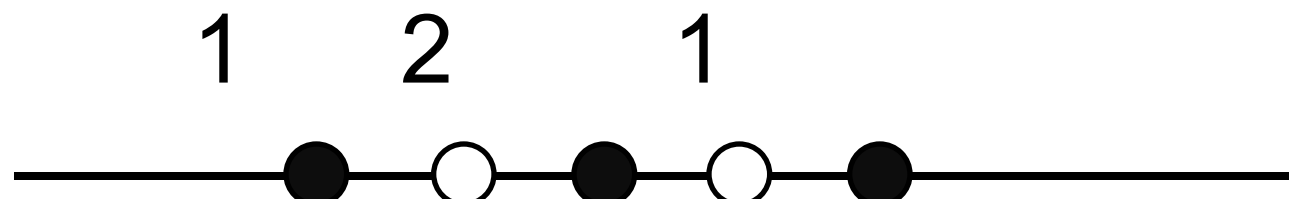
0-й шаг (начало)



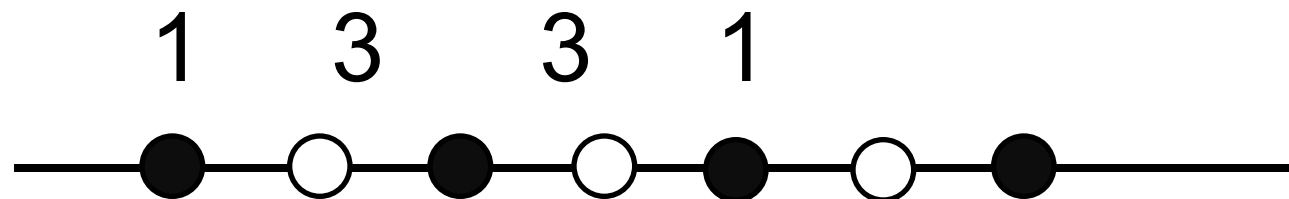
1-й шаг



2-й шаг



3-й шаг



Среднее смещение равно нулю, но средний квадрат пропорционален числу шагов или времени. То же и для броуновской частицы.

## Уравнение движения

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_0 - \frac{dx/dt}{B}$$

$F_0$  – сила, действующая на броуновскую частицу,  $m$  – масса броуновской частицы,  $B$  – коэффициент – подвижность частицы.

Движение броуновской частицы определяется хаотически меняющейся силой  $f$ , поэтому от постоянной силы  $F_0$  перейдём к  $f$ .

Используем следующие выражения

$$\frac{d(x^2)}{dt} = 2x \frac{dx}{dt}, \quad \frac{d^2(x^2)}{dt^2} = 2x \frac{d^2x}{dt^2} + 2 \left( \frac{dx}{dt} \right)^2,$$

умножим на  $x$  уравнение движения

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = f - \frac{dx/dt}{B}$$

и получим:

$$\frac{1}{2} m \frac{d^2(x^2)}{dt^2} - m \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 - xf + \frac{d(x^2)/dt}{2B} = 0$$



Усредним полученное выражение по времени:

$$\langle x \rangle = 0, \quad \langle f \rangle = 0, \quad \langle x \rangle \langle f \rangle = 0.$$

Перепишем энергию теплового движения:

$$m \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 = kT$$

Получаем:

$$\frac{1}{2} m \frac{d^2 \langle x^2 \rangle}{dt^2} - kT + \frac{d \langle x^2 \rangle / dt}{2B} = 0$$

Если  $\langle x^2 \rangle$  пропорционален времени ( $\langle x^2 \rangle \propto t$ ), то первый член исчезает, и мы получаем формулу Эйнштейна:

$$\langle x^2 \rangle = 2kT B t$$

В случае движения в плоскости

$$\langle r^2 \rangle = \langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle = 4kTbt$$

в объёме

$$\langle R^2 \rangle = \langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle + \langle z^2 \rangle = 6kTbt$$

# Броуновское движение как диффузия

Рассмотрим броуновское движение в  
поле сил тяжести;

в стационарном состоянии, когда установится бoльцмановское распределение концентрации частиц

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{Mgh}{RT}\right) = n_0 \exp\left(-\frac{fx}{kT}\right)$$

поток частиц, движущихся по направлению силы со скоростью  $Vf$ , должен компенсироваться диффузионным потоком в направлении уменьшения концентрации,

То есть

$$nBf = -D_{\text{бр}} \frac{dn}{dt}$$

$D_{\text{бр}}$  – коэффициент диффузии броуновских частиц.

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{fx}{kT}\right), \quad \frac{dn}{dx} = n_0 \left(-\frac{f}{kT}\right) \exp\left(-\frac{fx}{kT}\right)$$

Отсюда

$$Bf = \frac{fD}{kT} \Rightarrow D = BkT,$$

формула Эйнштейна принимает вид

$$\langle R^2 \rangle = 6Dt$$





# 46. Элементы неравновесной термодинамики. Кинетической коэффициенты. Теорема Онсагера.

В случае изолированной системы  
выполняется второе начало  
термодинамики

$$\frac{dS}{dt} \geq 0$$

и в случае равновесного состояния  
энтропия максимальна (тепловая  
смерть вселенной).

В открытых системах происходит постоянный обмен с окружающей средой энергией и веществом. Здесь даже малые воздействия могут привести к значительным последствиям. В описании неравновесных процессов используют понятие возрастание энтропии системы

$$dS/dt = \sigma$$

При определённых условиях суммарное уменьшение энтропии за счёт обмена с внешней средой может превысить её внутреннее производство. Появляется неустойчивость предшествующего неупорядоченного однородного состояния, возникают и возрастают крупномасштабные флуктуации.

При этом оказывается возможной  
самоорганизация – создание  
определённых структур из хаоса,  
неупорядоченности  
(примеры: тайфун, торнадо, смерчи).

Эти структуры могут  
последовательно переходить во всё  
более упорядоченные состояния. В  
таких системах энтропия убывает.

# Принцип Онсагера

Онсагер, на основе выше сказанного, предположил, что при небольших отклонениях от равновесия существует линейная связь между потоками  $I_i$  и термодинамическими силами  $X_j$ .

$$I_i = \sum_{j=1}^m L_{ij} X_j$$

$L_{ij}$  – кинематический или феноменологический коэффициент.

В термодинамике необратимых процессов скорость приращения энтропии (производство энтропии) за счёт необратимых процессов может быть представлена в виде

$$\sigma = \sum_{i=1}^m I_i X_i$$

Коэффициент  $L_{ij}$  отражает факт существования перекрёстных эффектов (процессов) перенос одной величины (заряд, масса, энергия и т.д.) неразрывно связан с переносом другой (импульс, температура и т.д.).



# Шумы

флуктуации накладывают  
ограничение на чувствительность  
приборов. Как правило,  
чувствительность не достигает  
уровня флуктуаций (например  
давление).

Тепловой шум: электроны в электрических приборах ведут себя подобно молекулам идеального газа, соответственно, их концентрация, в различных частях электрической системы, испытывает флуктуации, что приводит к скачкам напряжения и силы тока.

Если отношение «сигнал/шум» мало,  
то сигнал идёт с большим  
искажением либо его невозможно  
обнаружить.

Дробовой шум: шум, определяемый дискретностью электрического заряда.

В полупроводниках два типа носителей заряда: дырки и электроны, которые могут генерироваться и рекомбинировать.

Поэтому величина шума в полупроводниках в два раза выше, чем в проводниках.



# ЛЕКЦИЯ № 17.

## ВОПРОСЫ

47. Кристаллы. Кристаллическая решётка. Преобразования симметрии. Жидкие кристаллы.
48. Неравновесные процессы. Синергетика. Бифуркация.

47. Кристаллы. Кристаллическая  
решётка. Преобразования  
симметрии. Жидкие кристаллы.



Кристаллы (krystallos (греч.) – лёд) – твёрдые тела обладающие трёхмерной периодической атомной структурой и, при равновесных условиях образования, имеющие естественную форму правильных симметричных многогранников.

Кристаллы обладают симметрией. Здесь симметрия это свойство тела совмещаться с самим собой при определённых перемещениях, называемых преобразованиями или операциями симметрии.

Эти перемещения не должны сопровождаться изменением расстояния между атомами.

## Преобразования симметрии:

- 1) параллельный перенос всех точек тела на определённое расстояние (трансляция);
- 2) поворот тела вокруг некоторой оси на определённый угол;
- 3) отражение в плоскости;
- 4) инверсия или отражение в точке;  
а также все комбинации таких преобразований.

Таким образом, можно отменить основное отличие кристаллов от жидкостей и аморфных тел: периодичность пространственного расположения атомов, молекул или ионов, из которых состоит кристалл. Такая периодичность получила название дальнего порядка.

В аморфных и жидких телах упорядоченное расположение частиц может распространяться только на соседние атомы – ближний порядок.

Кристаллическая решётка –  
упорядоченное расположение  
атомов, молекул или ионов,  
характеризующиеся периодичной  
повторяемостью в трёх измерениях.

Плоские грани кристалла, образовавшегося в равновесных условиях, соответствуют атомным плоскостям, рёбра – рядам атомов. Расположение атомов соответствует минимуму энергии.

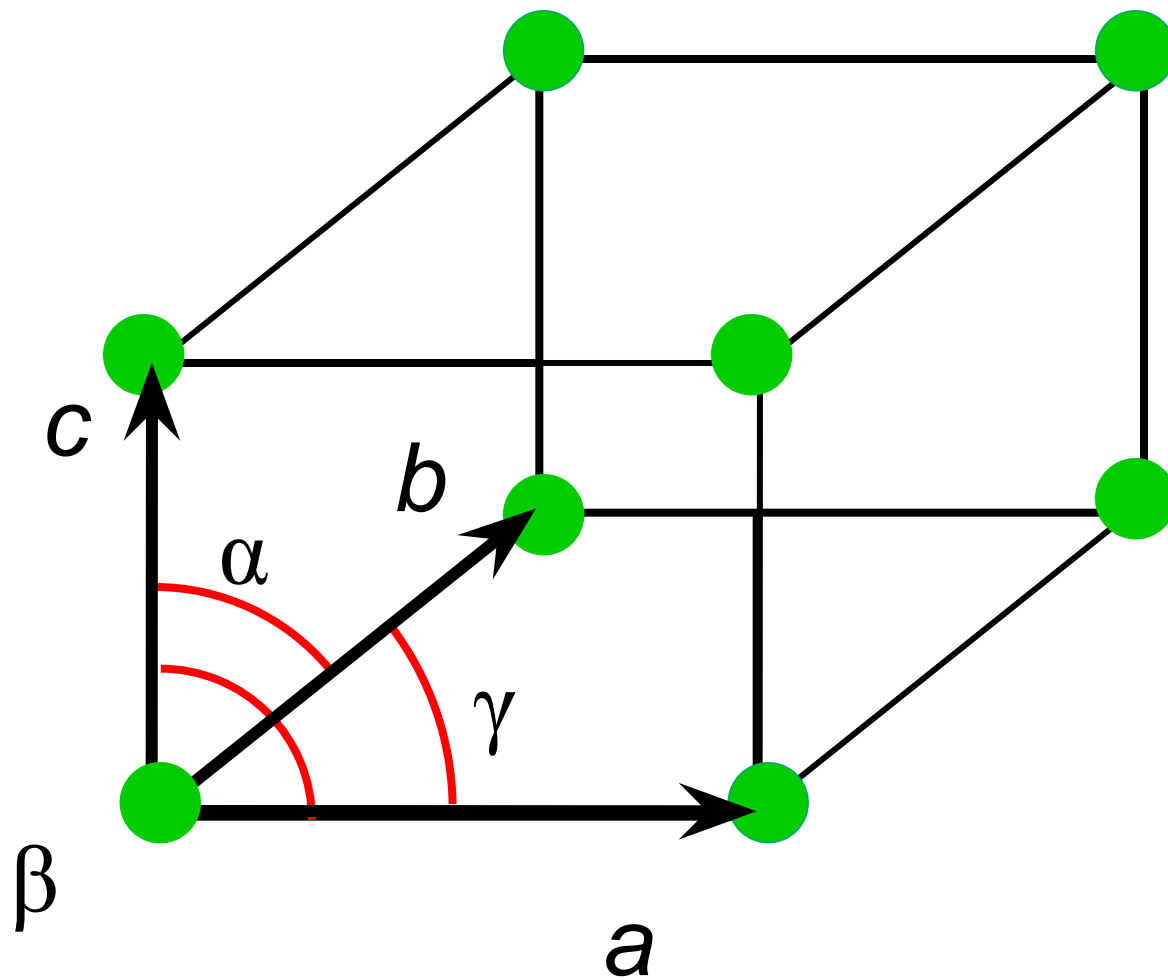
Для описания кристаллической решётки достаточно знать размещение атомов в её элементарной ячейке, повторением которой путём параллельных переносов (трансляций) образуется кристаллическая решётка.

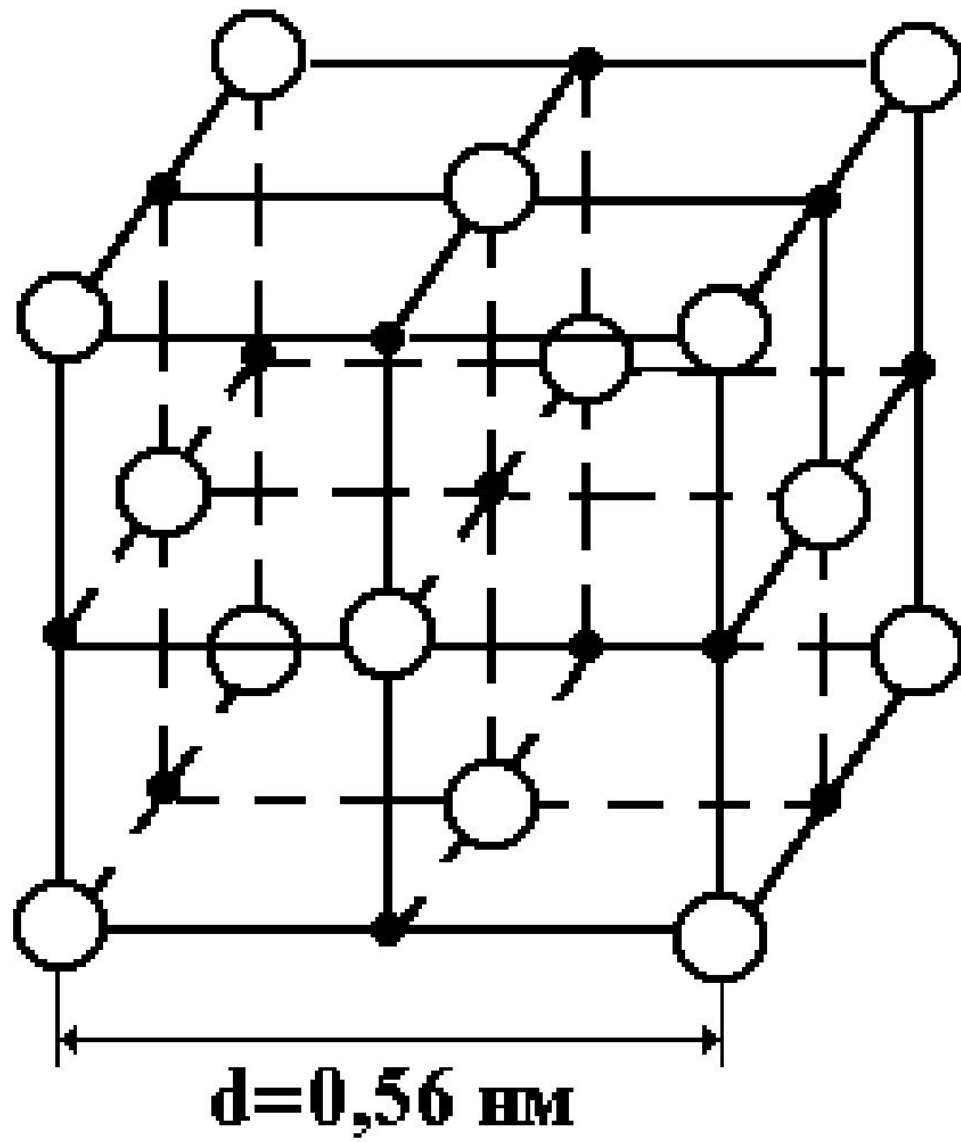


Элементарная ячейка имеет форму параллелепипеда. Рёбра элементарного параллелепипеда  $a$ ,  $b$ ,  $c$  называются постоянными или периодами кристаллической решётки либо векторами трансляции. Этот параллелепипед характеризуется также углами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  между рёбрами.

Параллелепипед минимального объёма, содержащий наименьшее число атомов, называется примитивной (элементарной) ячейкой.

Величины  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  однозначно определяют элементарную ячейку и называются её параметрами.





Кристаллическая решётка, как правило, обладает одновременно несколькими видами симметрии. Но возможны всего 230 комбинаций элементов симметрии, которые называются пространственными группами. 230 групп делятся на 32 класса. Классы, по форме элементарной ячейки делятся на семь кристаллических систем (сингоний).

1) Триклинная система.

$$a \neq b \neq c \text{ и } \alpha \neq \beta \neq \gamma.$$

Элементарная ячейка имеет форму  
косоугольного параллелепипеда.

2) Моноклинная система.

$$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ.$$

Элементарная ячейка имеет форму прямой призмы, в основании которой лежит параллелограмм (т.е. форму прямого параллелепипеда).

3) Ромбическая система.

$$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ.$$

Элементарная ячейка имеет форму  
прямоугольного параллелепипеда.



4) Тетрагональная система.

$$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ.$$

Элементарная ячейка имеет форму  
прямой призмы с квадратным  
основанием.

5) Ромбоэдрическая (или тригональная) система.

$$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ.$$

Элементарная ячейка имеет форму куба, деформированного сжатием или растяжением вдоль диагонали.

6) Гексагональная система.

$$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ.$$

Если составить вместе три элементарные ячейки, то получается правильная шестиугольная призма.

7) Кубическая система.

$$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ.$$

Элементарная ячейка имеет форму куба.

# Жидкие кристаллы

Особое состояние некоторых органических веществ, в котором они обладают свойствами жидкости – текучестью, но сохраняют определённую упорядоченность в расположении молекул и анизотропию ряда физических свойств, характерную для твёрдых кристаллов.

Число химических соединений для которых найдены жидкие кристаллы несколько тысяч. Но для использования годятся несколько десятков.

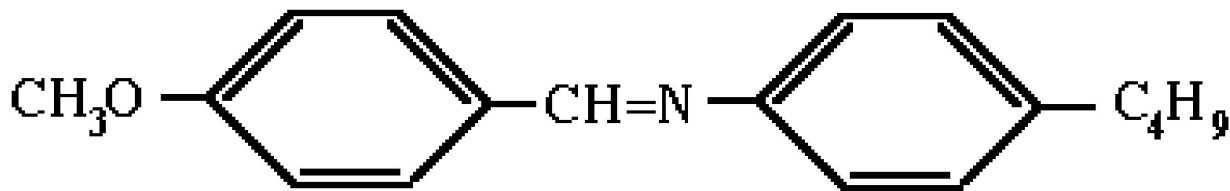
По способу получения различают два типа жидких кристаллов:  
*термотропные и лиотропные.*  
Первые образуются при нагревании твердых кристаллов или при охлаждении изотропных жидкостей и существуют в некотором температурном интервале.

Вторые образуются при растворении твердых органических веществ, например, в воде или других растворителях. Оба типа жидких кристаллов имеют несколько модификаций – жидкокристаллических фаз, каждой из которых на фазовой диаграмме соответствует определенная область.



Эта область зависит от типа вещества и может находиться как при низких до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , так и при высоких температурах  $\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

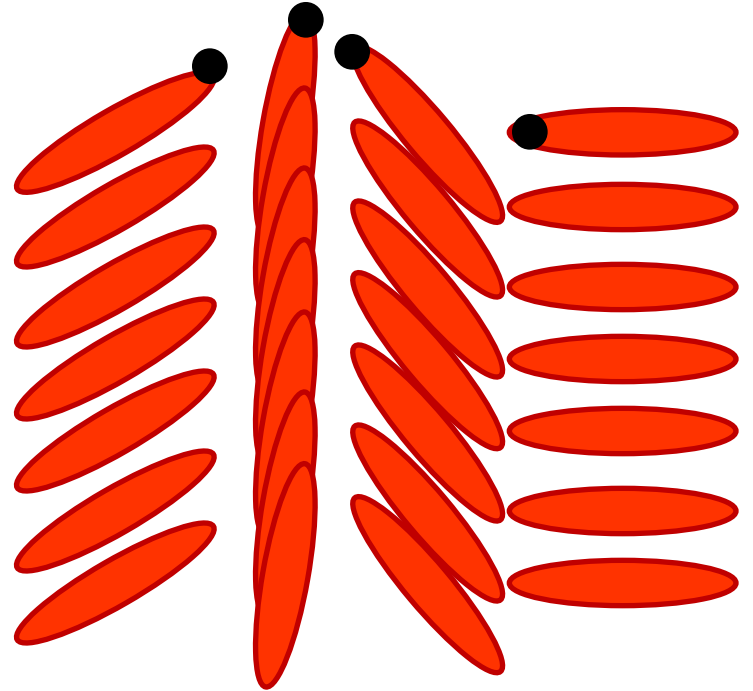
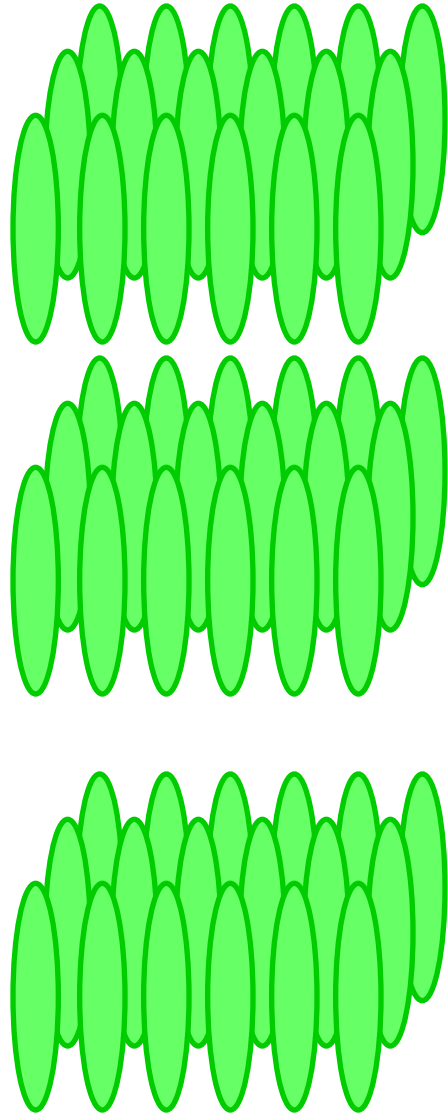
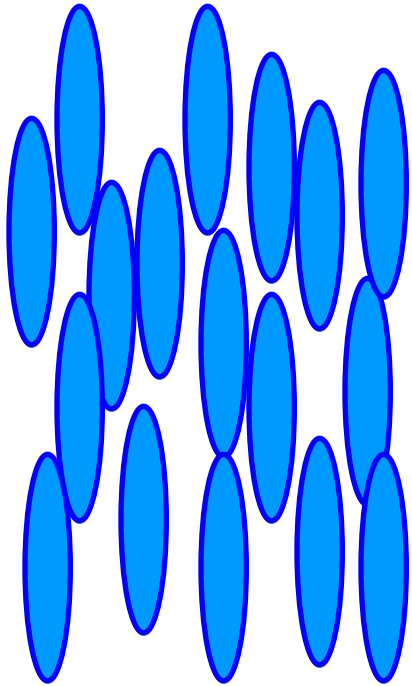
Представителем типичного термотропного жидкого кристалла является 4-метоксибензилиден-4' – бутиланилина (МББА), по форме похожий на стержни. Наличие нескольких бензольных образований (колец) до 2 и 3 в молекуле типично для жидких кристаллов.



Нематические жидкие кристаллы – молекулы параллельны, но сдвинуты вдоль своих осей, одна относительно другой на произвольные расстояния.

Смектические жидкие кристаллы – молекулы параллельны друг другу и расположены слоями.

Холестерические жидкие кристаллы – похожи на нематические, но отличаются дополнительным закручиванием молекул в направлении, перпендикулярном их длинным осям.





# 48. Неравновесные процессы. Синергетика. Бифуркация.

# Неравновесные процессы

Классическая термодинамика описывает стабильность, равновесие. Вблизи равновесия система однозначно реагирует на не слишком большое возмущение, возвращаясь в состояние равновесия.



При этом частицы, составляющие систему, взаимодействуют только на близких расстояниях и ничего «не знают» о частицах, расположенных достаточно далеко. Здесь вполне адекватна модель замкнутой системы.

Однако, если система далеко отклоняется от состояния равновесия, то возврат к начальному состоянию необязателен. Здесь целесообразно рассматривать модель открытых диссипативных систем, постоянно обменивающихся с окружающей средой энергией и веществом.

Именно в открытых системах для состояний, далёких от равновесия, возникают эффекты согласования, когда частицы как бы устанавливают связь друг с другом на макроскопических расстояниях, через макроскопические интервалы времени.

В результате согласованного взаимодействия надсистем происходят процессы упорядочения, возникновения из хаоса определённых структур, их преобразования и усложнения.

Возникновение макроскопических структур обусловлено рождением коллективных типов движения (мод) под действием крупномасштабных флуктуаций, их конкуренцией, отбором наиболее приспособленных мод,

ТО ЕСТЬ В КОНЕЧНОМ СЧЁТЕ СПОНТАННОЕ  
ВОЗНИКНОВЕНИЕ СТРУКТУР В  
НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗАНО С  
СОВМЕСТНЫМ КОЛЛЕКТИВНЫМ  
ПОВЕДЕНИЕМ ПОДСИСТЕМЫ,  
ОБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМУ.

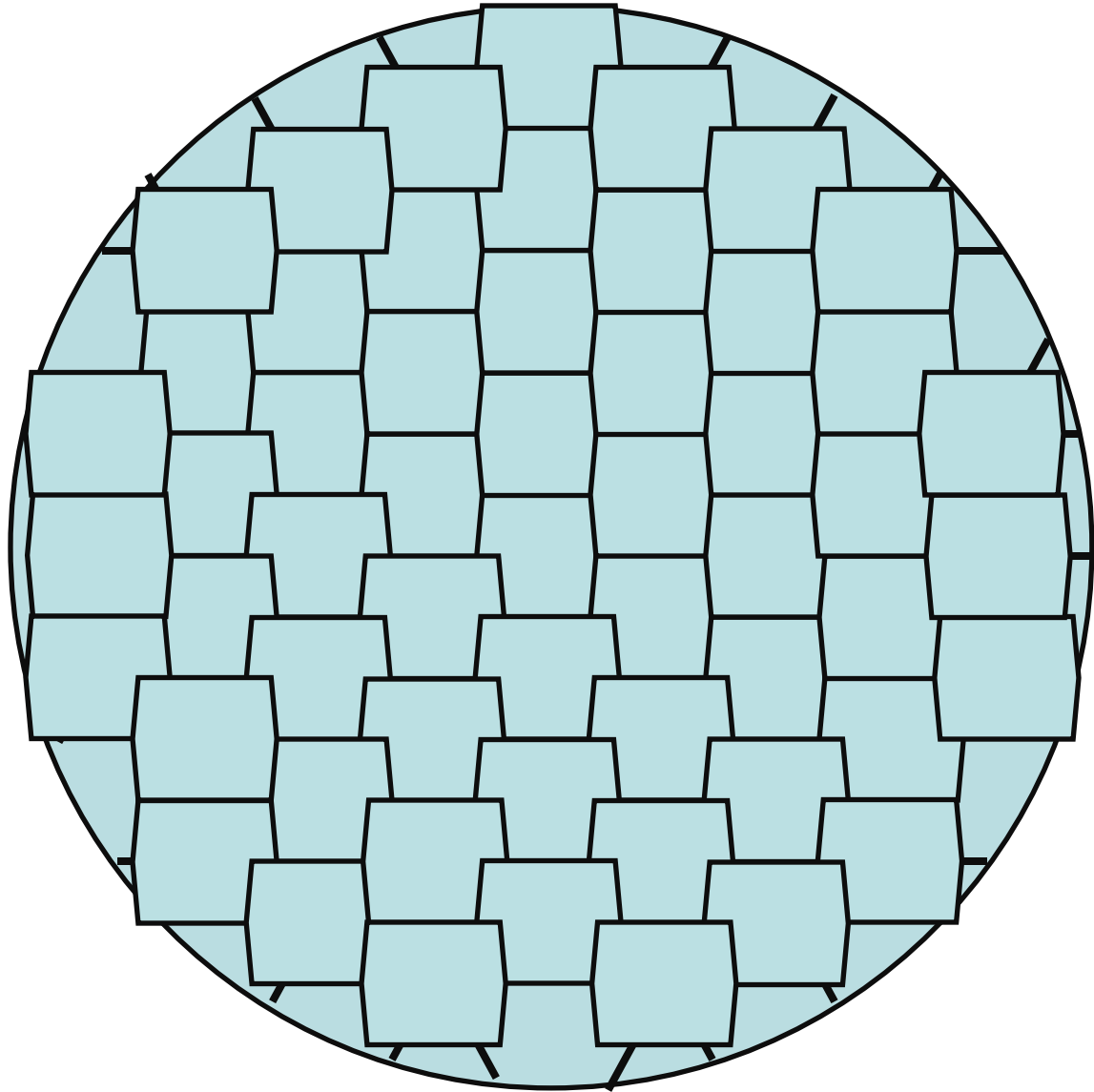
Область науки, изучающая эти процессы, получила название «синергетика».

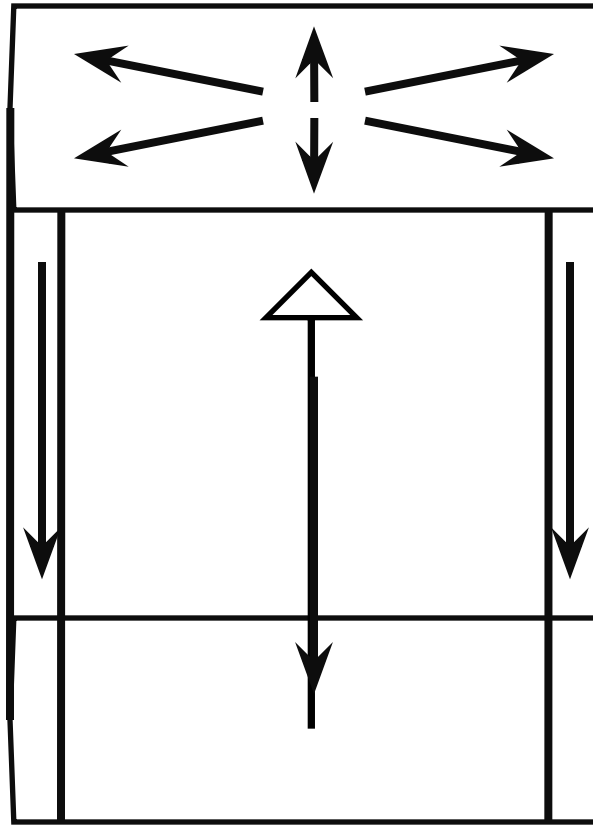
## Пример1. Ячейка Бенара.

На сковороду наливают тонкий слой минерального масла (5 мм) и подогревают снизу горячей водой.

При достижении критического градиента в жидкости возникают потоки и образуются красивые шестиугольные ячейки. В центре ячейки конвекционный поток движется вверх, а по краям – вниз.







$T_2$

$T_1 > T_2$

$T_1$

Ячейки Бенара в неравновесной термодинамике играют исключительную роль, поскольку в этом явлении очень отчётливо проявляются все основные черты термодинамики необратимых процессов.

По сравнению с однородным состоянием конвективные ячейки являются более высокоорганизованной структурой – открытая система отдаёт энтропию. Образование же её связано с неустойчивостью крупномасштабного конвективного движения и обусловлено следующими обстоятельствами.

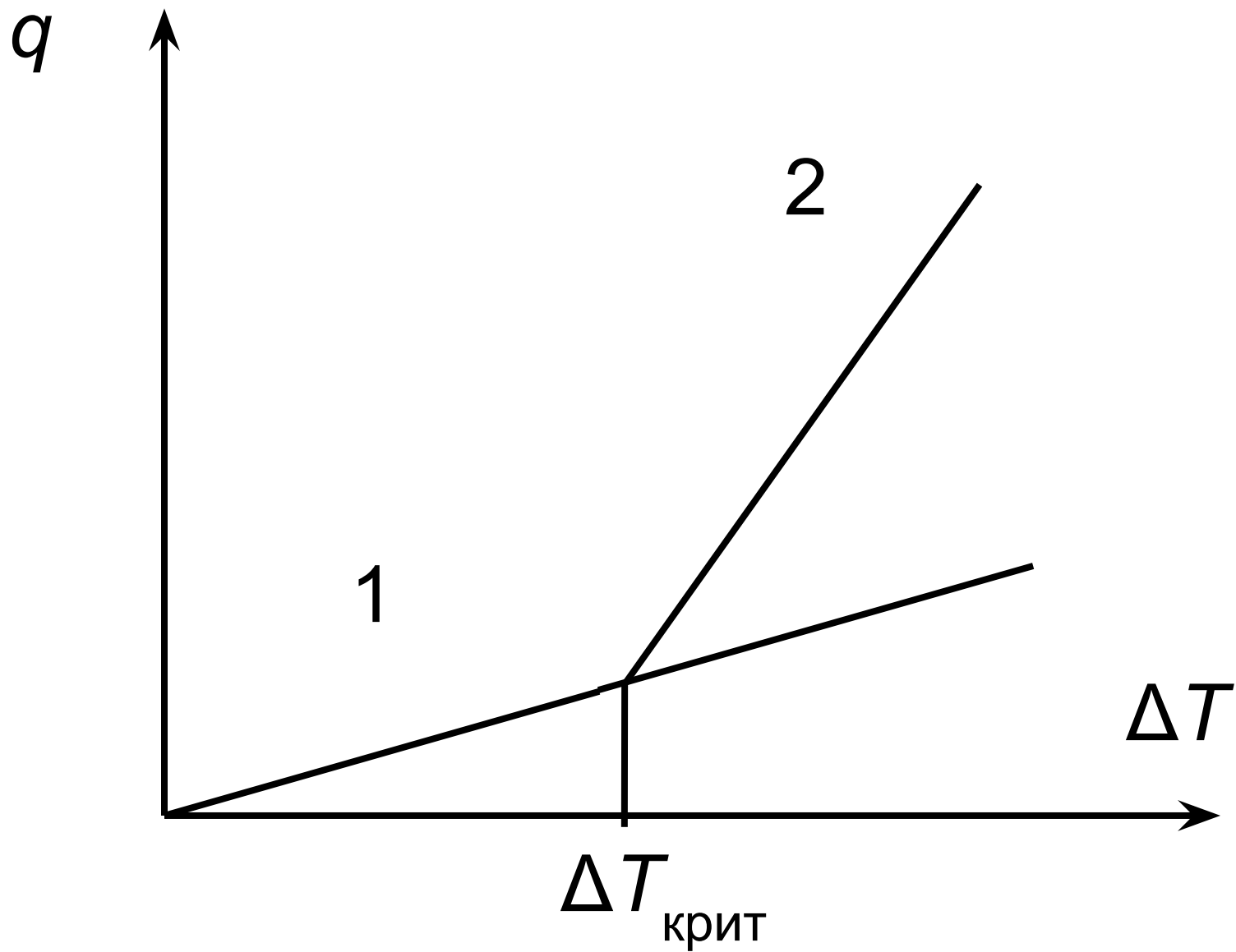
Если слой жидкости сильно нагреть, то возникает разность (градиент) температур  $\Delta T$  между нижней и верхней поверхностями. Такой температурный градиент называется инверсным, так как жидкость у нижней поверхности вследствие теплового расширения имеет меньшую плотность, чем вблизи верхней поверхности.

Из-за силы тяжести и архимедовой выталкивающей силы такая система оказывается неустойчивой, поскольку «лёгкий» нижний слой и «тяжёлый» верхний стремятся поменяться местами.

Однако, вследствие вязкости жидкости, при небольших градиентах температуры движение не возникает и тепло передаётся только путём теплопроводности.

Лишь при достижении критического значения температурного градиента появляется конвекционный поток, обладающий характерной структурой в виде шестиугольных ячеек. Внутри ячеек жидкость поднимается вверх, а по краям спускается вниз.

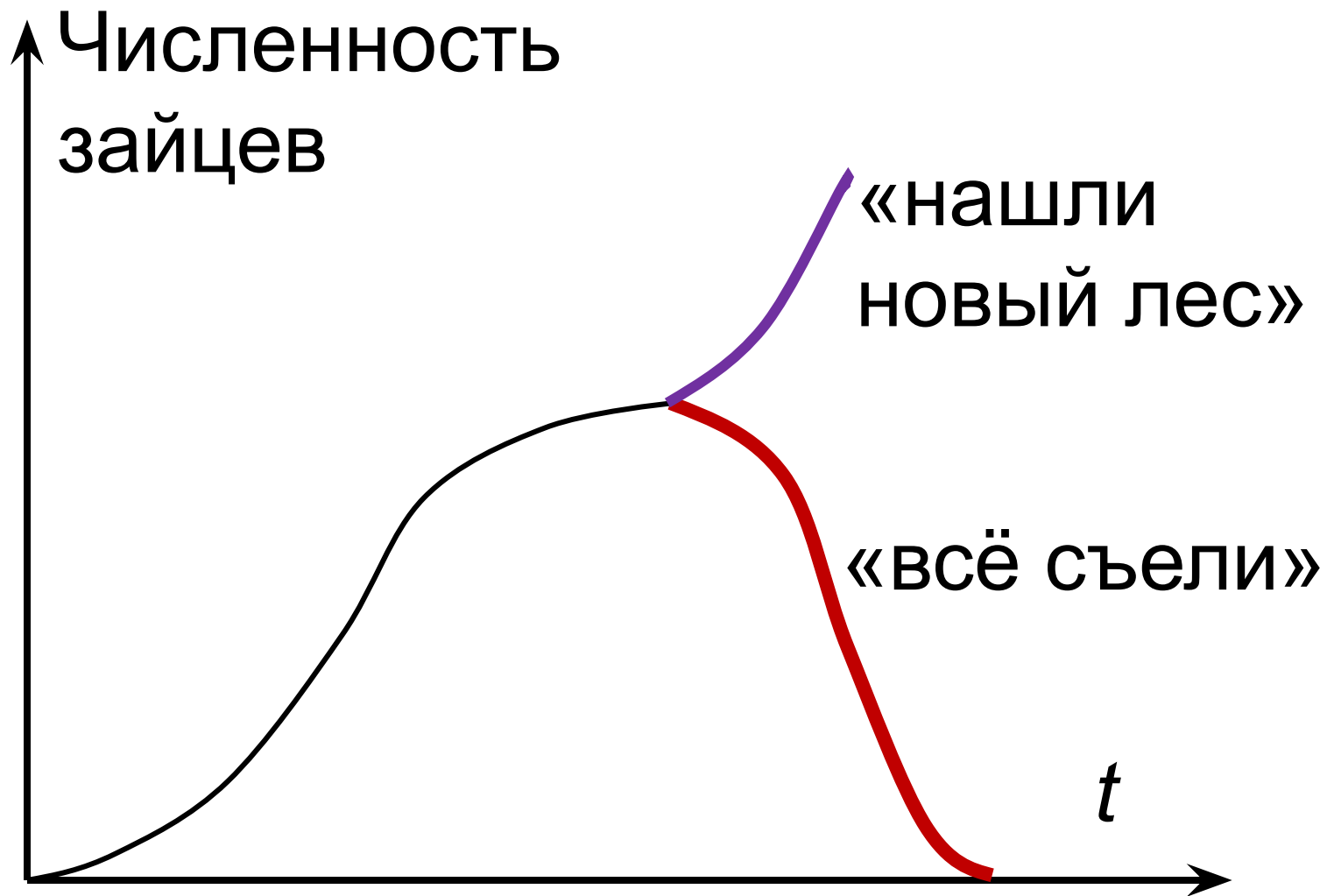




Бифуркация- качественное различие  
в поведении объекта, при  
незначительном изменении  
параметра, от которого зависит  
объект.

## Пример 2. Эволюция численности зайцев и рысей.

В результате взаимодействия двух биологических систем возникают периодические колебания численности особей.



Численность зайцев

Численность рысей

