

# Явления переноса в неравновесных системах

1. Теплопроводность
2. Диффузия
3. Внутреннее трение (вязкость)
4. Связь между коэффициентами переноса
5. Вакуум. Свойства разреженных газов

# Явления переноса в термодинамически неравновесных системах

В термодинамически неравновесных системах возникают особые необратимые процессы, называемые **явлениями переноса**, в результате которых происходит пространственный перенос энергии, массы, импульса.

К явлениям переноса относятся **теплопроводность** (обусловлена переносом энергии), **диффузия** (обусловлена переносом массы) и **внутреннее трение** (обусловлена переносом импульса).

Ограничимся рассмотрением одномерного переноса. Систему отсчета выбираем так, чтобы ось  $x$  была ориентирована в направлении переноса.

**Теплопроводность.** Если в одной области газа средняя кинетическая энергия молекул больше, чем в другой, то с течением времени вследствие постоянных столкновений молекул происходит процесс выравнивания средних кинетических энергий молекул, т.е. иными словами, **выравнивание температур**. Перенос энергии в форме теплоты подчиняется **закону Фурье**:

где 
$$j_E = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

$j_E$  - **плотность теплового потока** – величина, определяемая энергией, переносимой в форме теплоты в единицу времени через единичную площадку,

перпендикулярную оси  $x$ ; [Вт/(м<sup>2</sup>)]

$\lambda$  - **теплопроводность**; [Вт/(м·К)]

$\frac{dT}{dx}$  - **градиент температуры**, равный скорости изменения температуры на единицу длины  $x$  в направлении нормали к этой площадке.

**Знак минус показывает, что при теплопроводности энергия переносится в направлении убывания температуры:**

$j_E$  и  $\frac{dT}{dx}$  - имеют противоположные знаки.

**Теплопроводность  $\lambda$  численно равна плотности теплового потока при градиенте температуры, равным единице.**

**Можно доказать, что**

$$\lambda = \frac{1}{3} c_V \cdot \rho \cdot \langle v \rangle \cdot \langle l \rangle \quad (2)$$

**где**

$c_V$  - удельная теплоемкость газа при постоянном объеме (количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг газа на 1 К при постоянном  $V$ ),

$\rho$  - плотность газа,

$\langle v \rangle$  - средняя скорость теплового движения молекул,

$\langle l \rangle$  - средняя длина свободного пробега.

**Диффузия**. Явление диффузии заключается в том, что происходит самопроизвольное проникновение и перемешивание частиц двух соприкасающихся газов, жидкостей и даже твердых тел; **диффузия сводится к обмену масс частиц** этих тел, возникает и продолжается, пока существует градиент плотности. Во время становления МКТ по вопросу диффузии возникли противоречия. Так как молекулы движутся с огромными скоростями, диффузия должна происходить очень быстро. Если же открыть в комнате сосуд с пахучим веществом, то запах распространяется довольно медленно. Однако противоречия здесь нет. Молекулы при атмосферном давлении обладают малой **длиной свободного пробега** и, сталкиваясь с другими молекулами, в основном, «стоят» на месте.

Явление диффузии для химически однородного газа подчиняется **закону Фика**:

$$j_m = -D \frac{d\rho}{dx} \quad (3)$$

где  $j_m$  - **плотность потока массы** – величина, определяемая массой вещества, диффундирующего в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную оси  $x$ ; [кг/(м<sup>2</sup>·с)]

$D$  - **коэффициент диффузии** [м<sup>2</sup>/с];

$\frac{d\rho}{dx}$  - **градиент плотности**, равный скорости изменения плотности на единицу длины  $x$ .

**Знак минус показывает, что перенос массы происходит в направлении убывания плотности:**

$j_m$  и  $\frac{d\rho}{dx}$  - имеют противоположные знаки.

**коэффициент диффузии  $D$  численно равен плотности потока массы при градиенте плотности, равном единице.**

**Согласно кинетической теории газов,**

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \cdot \langle l \rangle \quad (4)$$

**Внутреннее трение (вязкость). Механизм возникновения внутреннего трения между параллельными слоями газа (жидкости), движущимися с различными скоростями, заключается в том, что из-за хаотического теплового движения происходит обмен между слоями, в результате чего импульс слоя, движущегося быстрее, уменьшается, движущегося медленнее – увеличивается, что приводит к торможению слоя, движущегося быстрее, и ускорению слоя, движущегося медленнее.**

Сила внутреннего трения между двумя слоями подчиняется **закону Ньютона**:

$$F = \eta \cdot \left| \frac{dv}{dx} \right| \cdot S \quad (5)$$

где  $\eta$  - **динамическая вязкость (вязкость)** [Па·с];

$\frac{dv}{dx}$  - **градиент скорости, показывающий быстроту изменения скорости в направлении  $x$ , перпендикулярном направлению движения слоев;**

$S$  - **площадь, на которую действует сила  $F$ .**

Взаимодействие двух слоев согласно второму закону Ньютона можно рассматривать как процесс, при котором от одного слоя к другому в единицу времени передается импульс, по модулю равный действующей силе. Тогда выражение (5) можно представить в виде

$$j_F = -\eta \frac{dv}{dx} \quad (6) \quad j_F = \frac{F}{S} = \frac{1}{S} \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

где  $j_F$  - **плотность потока импульса** – величина, определяемая полным импульсом, переносимым в единицу времени в положительном направлении оси  $x$  через единичную площадку, перпендикулярную оси  $x$

$\frac{dv}{dx}$  - градиент скорости.

Знак минус указывает, что импульс переносится в направлении убывания скорости:

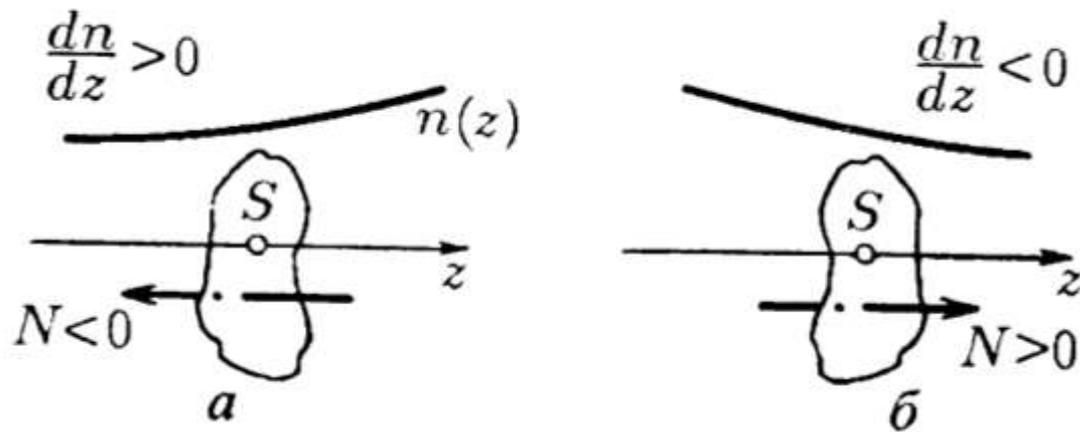
$j_F$  и  $\frac{dv}{dx}$  - имеют противоположные знаки.

**Динамическая  $\eta$  вязкость численно равна плотности потока импульса при градиенте скорости, равном единице; она вычисляется по формуле**

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \cdot \langle v \rangle \cdot \langle l \rangle \quad (7)$$

**Из сопоставления формул (1), (3) и (6), описывающих явления переноса, следует, что закономерности всех явлений переноса сходны между собой.**

**Эти законы были установлены задолго до того, как они были обоснованы и выведены из МКТ, позволившей установить, что внешнее сходство их математических выражений обусловлено общностью лежащего в основе явлений теплопроводности, диффузии и внутреннего трения молекулярного механизма перемешивания молекул в процессе их хаотического движения и столкновений друг с другом.**



**Пример, позволяющий быстро проверить понимание понятий потоков тепла, массы или импульса.**

**Законы Фурье, Фика и Ньютона не вскрывают молекулярно-кинетического смысла коэффициентов  $\lambda, D$  и  $\eta$ .**

**Выражения для коэффициентов переноса выводятся из кинетической теории. Формулы (2), (4) и (7) связывают коэффициенты переноса и характеристики теплового движения молекул. Из этих формул вытекают простые зависимости между  $\lambda, D$  и  $\eta$ :**

$$\eta = \rho D$$

и

$$\frac{\lambda}{\eta \cdot c_V} = 1$$

# Вакуум.

## Свойства ультраразреженных газов.

Если из сосуда откачан газ, то по мере понижения давления число столкновений молекул друг с другом уменьшается, что приводит к увеличению их длины свободного пробега. При достаточно большом разрежении столкновения между молекулами относительно редки, поэтому основную роль играют столкновения молекул со стенками сосуда. **Вакуумом** называется состояние газа, при котором средняя длина свободного пробега  $\langle l \rangle$  сравнима или больше характерного линейного размера сосуда  $d$ , в котором газ находится.

В зависимости от соотношения  $\langle l \rangle$  и  $d$  различают следующие виды вакуума:

$\langle l \rangle \ll d$  - низкий;

$\langle l \rangle \leq d$  - средний;

$\langle l \rangle > d$  - высокий;

$\langle l \rangle \gg d$  - сверхвысокий.

Газ в состоянии высокого вакуума называется **ультра-разреженным**.

**Вопросы создания вакуума имеют большое значение в технике, так как, например, во многих современных электронных приборах используются электронные пучки, формирование которых возможно лишь в условиях вакуума. Для получения различных степеней разрежения применяются вакуумные насосы. В настоящее время применяются вакуумные насосы, позволяющие получить предварительное разрежение (форвакуум) до примерно 0.13 Па, а также вакуумные насосы и лабораторные приспособления, позволяющие получить давление до 13,3 мкПа – 1,11 пПа ( $10^{-7}$  -  $10^{-14}$  мм рт. ст.).**

## Некоторые важные свойства ультраразреженных газов.

Так как в состоянии ультраразрежения молекулы практически друг с другом не сталкиваются, то газ в этом состоянии не обладает внутренним трением. Отсутствие соударений между молекулами разреженного газа отражается также на механизме теплопроводности. Если при обычных давлениях перенос энергии молекулами производится "эстафетой", то при ультраразрежении каждая молекула сама должна перенести энергию от одной стенки сосуда к другой.

**Явление уменьшения теплопроводности вакуума при понижении давления используется на практике для создания тепловой изоляции. Например, для уменьшения теплообмена между телом и окружающей средой тело помещают в сосуд Дьюара, имеющий двойные стенки, между которыми находится разреженный воздух, теплопроводность которого очень мала.**

**Рассмотрим два сосуда 1 и 2, поддерживаемых соответственно при температурах  $T_1$  и  $T_2$  и соединенных между собой трубкой. Если длина свободного пробега молекул гораздо меньше диаметра соединительной трубки  $\langle l \rangle \ll d$ , то стационарное состояние газа характеризуется равенством давлений в обоих сосудах  $p_1 = p_2$ .**

Стационарное же состояние ультаразреженного  $\langle l \rangle \gg d$  газа находящегося в двух сосудах, соединенных трубкой, возможно лишь в том случае, когда встречные потоки частиц, перемещающихся из одного сосуда в другой, одинаковы, т.е.

$$n_1 \langle v_1 \rangle = n_2 \langle v_2 \rangle \quad (1)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  - концентрации молекул в обоих сосудах;

$\langle v_1 \rangle$  и  $\langle v_2 \rangle$  - средние скорости молекул.



Учитывая, что  $n = p/(kT)$  и  $\langle v \rangle = \sqrt{8RT/(\pi \cdot \mu)}$ , из условия (1) получаем

$$\frac{p_1}{p_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \quad (2)$$

В условиях высокого вакуума выравнивания давления не происходит.