

## Тема: Явления переноса

Если в веществе существует пространственная неоднородность плотности, температуры или скорости упорядоченного перемещения отдельных слоёв вещества, то происходит самопроизвольное выравнивание этих неоднородностей. В веществе возникают потоки энергии, молекул вещества, а также импульса упорядоченного движения частиц. Эти потоки характерны для неравновесных состояний вещества и являются физической основой особых процессов, объединённых общим названием **явлений переноса**.

**Явлениями переноса** называют группу процессов, связанных с неоднородностями плотности (диффузия), температуры (теплопроводность) и скорости упорядоченного перемещения отдельных слоёв вещества (вязкость). Выравнивание таких неоднородностей и приводит к возникновению явлений переноса: **диффузии, теплопроводности и вязкости** (или **внутреннего трения**).

### Средняя длина свободного пробега молекулы

Согласно молекулярно-кинетической теории, молекулы газа находятся в постоянном хаотическом движении, перемещаясь по всему объёму, который занимает газ. Средняя скорость хаотического движения исчисляется сотнями и даже тысячами метров в секунду. Но перемещение молекул по объёму происходит со скоростями гораздо меньшими. Это вызвано тем, что в процессе хаотического движения происходит постоянное сближение молекул. Сблизившиеся друг с другом молекулы под действием сил взаимного отталкивания, изменяют направление своего движения. Эффект изменения направления движения называют **соударением молекул**. В результате соударения молекулы движутся по ломаным линиям, что и заменяет скорость перемещения по объёму.

Расстояние  $\lambda$ , проходимое молекулой от одного соударения до другого, называют **длиной свободного пробега**. Так как при хаотическом движении соударения носят случайный характер, то длина свободного пробега  $\lambda$  все время меняется. Поэтому можно говорить о **средней длине свободного пробега**  $\langle \lambda \rangle$ . Величина  $\langle \lambda \rangle$  является характеристикой всей совокупности молекул газа при заданных значениях давления и температуры.

**Средней длиной свободного пробега молекулы**  $\langle l \rangle$  называется среднее расстояние, которое пролетает молекула между двумя последовательными столкновениями.

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n},$$

где  $\langle l \rangle$  - средняя длина свободного пробега молекулы, м;  $n$  - концентрация молекул газа,  $\frac{1}{\text{м}^3}$ ,

$d$  - эффективный диаметр молекулы, м.

**Эффективным диаметром молекулы**  $d$  называется минимальное расстояние, на которое могут приблизиться молекулы друг к другу при столкновении.

### Явление диффузии

**Диффузией** называется явление самопроизвольного взаимного проникновения соприкасающихся веществ друг в друга вследствие теплового движения атомов или молекул вещества, приводящее к выравниванию их концентраций по всему занимаемому объёму.

В химически однородном веществе явление диффузии заключается в переносе массы вещества из мест с большей концентрацией молекул (то есть с большей плотностью вещества), в места с их меньшей концентрацией (или меньшей плотностью).

Явлением диффузии объясняется, например, распространение запахов, смешивание разнородных жидкостей, процесс растворения твердых тел в жидкостях, сварка металлов путем их расплавления или путем давления.

Явление диффузии наблюдается во всех средах: твёрдых, жидких и газообразных, однако происходит она с разными скоростями.

Наиболее быстро диффузия протекает в газах. Благодаря диффузии по комнате быстро распространяется запах духов. Значительно медленнее в жидкостях. Например, если кусочек сахара опустить на дно стакана с водой и воду не перемешивать, то пройдет несколько дней, прежде чем раствор станет однородным. Ещё медленнее происходит диффузия твёрдых веществ друг в друга. Проводили такой опыт: на золотой слиток положили слиток свинца, и под грузом за пять лет свинцовый слиток проник в золотой на глубину около одного сантиметра.

Диффузия подтверждает основные положения молекулярно-кинетической теории: молекулярное строение вещества и хаотический характер теплового движения молекул.

Диффузия играет большую роль в природе. Благодаря диффузии поддерживается однородный состав атмосферного воздуха вблизи Земли. Диффузия растворов различных солей обеспечивает питание растений, а так же играет огромную роль в клеточных процессах.



### Закон Фика для явления диффузии

Наблюдения показывают, что скорость диффузии прямо пропорциональна площади поперечного сечения образца, а также разности концентраций взаимодействующих веществ. Процесс диффузии ускоряется с повышением температуры, так как увеличивается скорость теплового движения молекул.

Явление диффузии в газах описывается **законом Фика**:

$$dm = -D \frac{d\rho}{dx} dS dt, \quad (1)$$

где  $dm$  - масса, переносимая в процессе диффузии за время  $dt$  через площадку площадью  $dS$ , расположенную перпендикулярно потоку вещества, кг,

$\frac{d\rho}{dx}$  - градиент плотности вещества (показывает на сколько  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  изменяется плотность вещества  $\rho$  при перемещении на  $l$  метр вдоль направления потока вещества),  $\left[ \frac{d\rho}{dx} \right] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^4}$ .

$dS$  - элемент площади поверхности,  $\text{м}^2$ ;  $dt$  - время, с,

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle - \text{коэффициент диффузии, } [D] = \frac{\text{м}^2}{\text{с}},$$

**Физ. смысл коэффициента диффузии:** он равен массе вещества в кг, которая переносится через  $1 \text{ м}^2$  поверхности, расположенной перпендикулярно потоку за время, равное 1 с.

(например:  $D = 10 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$  означает, что при градиенте плотности  $\frac{d\rho}{dx} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^4}$  через поверхность в  $1 \text{ м}^2$  за 1 с диффундирует 10 кг вещества)

$\langle l \rangle$  - средняя длина свободного пробега молекулы, м;

$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8 kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8 RT}{\pi \mu}}$  - средняя арифметическая скорость молекулы газа,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  $m_0$  - масса одной молекулы газа, кг.

При нормальных условиях:

- для газов  $D \approx (0.1 \div 1) 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,

- для жидкостей  $D \approx 10^{-9} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,

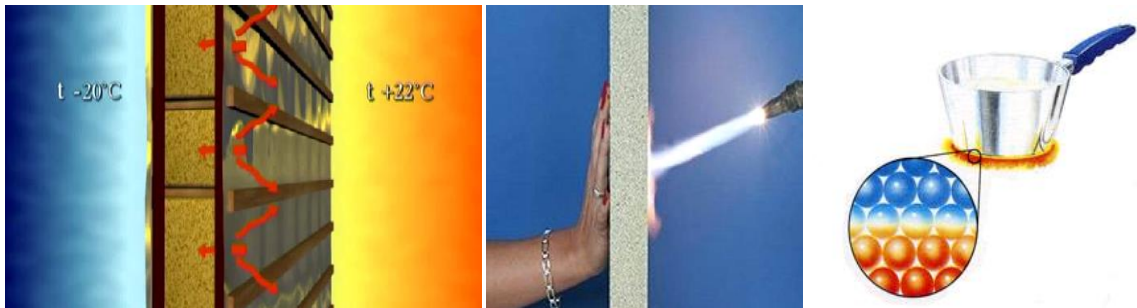
- для твёрдых тел  $D \approx 10^{-14} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ .

Из сравнения следует, что в газах скорость диффузии в 100 000 раз быстрее, чем в жидкостях, а жидкостях в 100 000 раз быстрее, чем в твёрдых телах.

Знак минус «-» в уравнении (1) указывает на то, что диффузия происходит в направлении уменьшения плотности вещества.

### Явление теплопроводности

**Теплопроводностью** называется процесс передачи теплоты от более нагретых участков тела менее нагретым в результате теплового движения молекул (*переносимой величиной является тепловая энергия*).



**Теплопроводность** возникает при наличии разности температур, вызванной какими-либо внешними причинами. При этом молекулы газа в разных местах его объёма имеют разные кинетические энергии и хаотическое тепловое движение молекул приводит к *направленному переносу внутренней энергии газа*.

(в подвижной неравномерно нагретой среде (например, в жидкости или газе) процесс передачи теплоты в основном обусловлен **конвекцией** (это процесс механического перемешивания холодных и горячих масс вещества в поле силы тяжести))

Явление теплопроводности в газах описывается **законом Фурье**:

$$dQ = -K \frac{dT}{dx} dS dt, \quad (2)$$

где  $dQ$  - переносимая в процессе диффузии за время  $dt$  через площадку площадью  $dS$ , расположенную перпендикулярно потоку вещества

$$K = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle c_V - \text{коэффициент теплопроводности, } [K] = \frac{Вт}{м \cdot К}$$

**Физ. смысл коэффициента теплопроводности:** он равен количеству теплоты в Дж, которая переносится через  $1 м^2$  поверхности, расположенной перпендикулярно потоку за время, равное 1 с.

(например:  $K = 5 \frac{Вт}{м \cdot К}$  означает, что при градиенте температуры  $\frac{dT}{dx} = 1 \frac{К}{м}$  через поверхность в  $1 м^2$  за 1 с переносится 5 Дж теплоты)

$\rho$  - плотность вещества,  $\frac{кг}{м^3}$ ;  $\langle v \rangle$  - средняя арифметическая скорость молекулы газа,  $\frac{м}{с}$ ,

$\langle l \rangle$  - средняя длина свободного пробега молекулы, м;  $c_V$  - удельная теплоёмкость газа при постоянном объёме,  $\frac{Дж}{кг \cdot К}$ ,

$\frac{dT}{dx}$  - градиент температуры (показывает, на сколько  $\frac{кг}{м^3}$  изменяется плотность вещества  $\rho$  при перемещении на 1 метр

вдоль направления потока вещества),  $\left[ \frac{dT}{dx} \right] = \frac{К}{м}$ ,

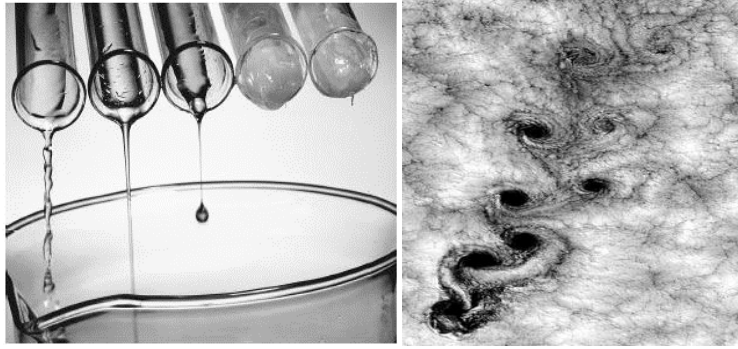
$dS$  - элемент площади поверхности,  $м^2$ ;  $dt$  - время, с.

Знак минус «-» в уравнении (2) указывает на то, что теплопроводность происходит в направлении уменьшения температуры вещества.

Материал	Теплопроводность, $\frac{Вт}{м \cdot К}$	Материал	Теплопроводность, $\frac{Вт}{м \cdot К}$
Графен	(4840±440)—(5300±480)	Олово	67
Алмаз	1001—2600	Оксид цинка	54
Графит	278,4—2435	Сталь	47
Карбид кремния	490	Кварц	8
Серебро	430	Стекло	1-1,15
Медь	382—390	КПТ-8	0,7
Оксид бериллия	370	Вода при нормальных условиях	0,6
Золото	320	Кирпич строительный	0,2—0,7
Алюминий	202—236	Силиконовое масло	0,16
Нитрид алюминия	200	Пенобетон	0,05—0,3
Нитрид бора	180	Древесина	0,15
Кремний	150	Нефтяные масла	0,12
Латунь	97—111	Свежий снег	0,10—0,15
Хром	93,7	Вата	0,055
Железо	92	Воздух (300 К, 100 кПа)	0,026
Платина	70	Вакуум (абсолютный)	0 (строго)

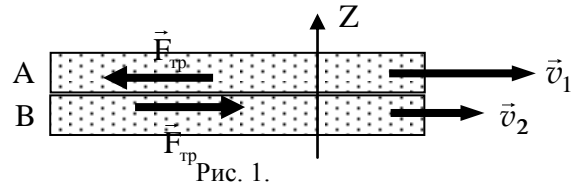
## Явление вязкости (или явление внутреннего трения)

**Вязкостью** (или **внутренним трением**) называется свойство текучих сред (газов, жидкостей, расплавленных металлов) оказывать сопротивление перемещению частей среды относительно друг друга (*переносимой величиной является импульс*).



**Внутреннее трение (вязкость)** связано с возникновением сил трения между слоями газа, перемещающимися параллельно друг другу с различными по модулю скоростями. Со стороны слоя, движущегося быстрее, на более медленно движущийся слой действует ускоряющая сила и, наоборот, медленно перемещающиеся слои тормозят более быстро движущиеся слои газа. Силы трения, которые при этом возникают, направлены по касательной к поверхности соприкосновения слоев. С молекулярно-кинетической точки зрения причиной вязкости является наложение упорядоченного движения слоев газа с различными скоростями  $\vec{v}$  и хаотического теплового движения молекул.

Рассмотрим два слоя А и В жидкости, движущихся параллельно друг другу со скоростями  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  (рис. 1). Благодаря тепловому движению молекулы из слоя В переходят в слой А и «переносят» в этот слой импульсы  $m_0\vec{v}_2$  своего упорядоченного движения. Если  $v_1 > v_2$ , то такие молекулы при столкновениях с частицами слоя А ускоряют свое упорядоченное движение, а молекулы слоя А — замедляют. При переходе молекул из быстрее движущегося слоя А в слой В они переносят большие импульсы  $m_0\vec{v}_1$ , и соударения между молекулами приводят к ускорению упорядоченного движения молекул слоя В. В результате этих процессов переноса импульсов молекул между слоями А и В возникают силы трения, направленные как уже сказано выше, по касательной к поверхности соприкосновения слоев.



### Силы вязкого трения

Еще Ньютон установил опытным путем, что при скольжении друг относительно друга двух параллельных плоскостей, пространство между которыми заполнено жидкостью, силы вязкого трения препятствуют этому скольжению (рис. 2). Так, при движении со скоростью  $\vec{v}$  верхней плоскости относительно нижней возникает сила вязкого трения, направленная против движения и равная

$$F_\tau = \eta S \frac{v}{h} \quad (3)$$

Эта сила пропорциональна площади поверхности  $S$  и изменению скорости течения жидкости на единицу длины в поперечном направлении —  $\frac{v}{h}$  (то есть градиенту скорости в направлении, перпендикулярном течению жидкости) и зависит также от вязкости жидкости  $\eta$ .

Формула (3) справедлива, если расстояние  $h$  между пластинами значительно меньше их линейных размеров. Частицы жидкости, прилегающие к верхней пластине, движутся вместе с ней со скоростью  $\vec{v}$  (увлекаются пластиной). Напротив, частицы жидкости вблизи нижней (неподвижной) пластины находятся в покое (прилипают к пластине).

Представим, что жидкость между пластинами состоит из плоских параллельных слоев, движущихся равномерно (рис. 3). Нетрудно понять, что каждый вышележащий слой увлекает за собой нижний соседний слой с силой  $F_\tau$ . В свою очередь, этот нижний слой тормозит движение верхнего слоя с той же силой  $F_\tau$ . На каждый слой действуют сверху и снизу две равные, но противоположно направленные силы. Скорость слоев возрастает от нижнего слоя к верхнему линейно (рис. 3), а силы трения, действующие на каждый из слоев, одинаковы. Как результат, усилие  $F = F_\tau$ , приложенное к верхней пластине, передается на нижнюю пластину.

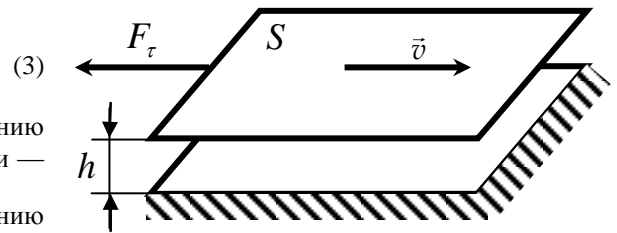


Рис. 2

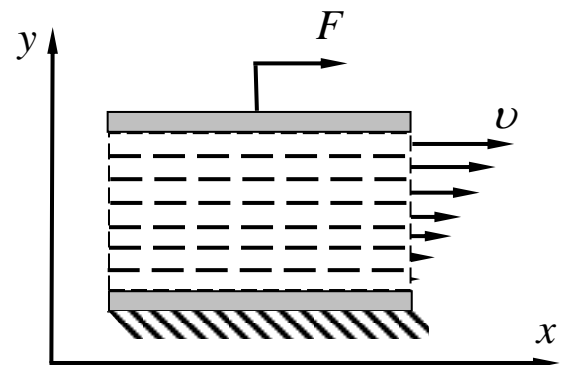


Рис. 3

Явление вязкости в газах описывается **законом Ньютона** (1687) (или **уравнением внутреннего трения**):

$$dp = -\eta \frac{dv}{dx} dS dt, \quad (4)$$

где  $dp$  - импульс, переносимый в процессе вязкого трения за время  $dt$  через площадку площадью  $dS$ , расположенную перпендикулярно потоку вещества,

$\frac{dv}{dx}$  - градиент скорости (показывает, на сколько  $\frac{m}{c}$  изменяется скорость течения среды при перемещении на  $l$  метр от слоя

к слою перпендикулярно течению жидкости),  $\left[ \frac{dv}{dx} \right] = \frac{l}{c}$ ,

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle - \text{коэффициент вязкости, Па} \cdot \text{с (Паскаль-секунда),}$$

**Физ. смысл коэффициента вязкости:** он равен импульсу в  $H \cdot c$ , который переносится через  $1 \text{ м}^2$  поверхности, расположенной перпендикулярно потоку за время, равное  $1 \text{ с}$ .

$\rho$  - плотность вещества,  $\frac{кг}{м^3}$ ;  $\langle v \rangle$  - средняя арифметическая скорость молекулы газа,  $\frac{м}{с}$ ,

$\langle l \rangle$  - средняя длина свободного пробега молекулы,  $м$ ;  $dS$  - элемент площади поверхности,  $м^2$ ;  $dt$  - время,  $с$ .

Для воздуха при нормальных условиях  $\eta \approx 0,182 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,

Для воды при комнатной температуре  $\eta \approx 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,

Для глицерина при комнатной температуре  $\eta \approx 1,5 \text{ Па} \cdot \text{с}$

Знак минус «-» в уравнении (4) указывает на то, что вязкость происходит в направлении уменьшения скорости перемещения слоёв вещества