|  |  |
| --- | --- |
| мы знаем, что молекулы в газе движутся со скоростью звука, с такой же скоростью движется пуля. Однако, находясь в противоположном конце комнаты, запах разлитой пахучей жидкости мы почувствуем через сравнительно большой промежуток времени. Это происходит потому, что молекулы движутся хаотически, сталкиваются друг с другом, траектория движения у них ломанная.         Рассмотрим некоторые явления, происходящие в газах. |  |

Распространение молекул примеси в газе от источника называется ***диффузией***.

       В состоянии равновесия температура *Т* и концентрация *n* во всех точках системы одинакова. При отклонении плотности от равновесного значения в некоторой части системы возникает движение компонент вещества в направлениях, приводящих к выравниванию концентрации по всему объему системы. Связанный с этим движением перенос вещества обусловлен*диффузией*. Диффузионный поток будет пропорционален градиенту концентрации:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%CC%EE%EB%E5%EA%F3%EB%FF%F0%ED%E0%FF%20%F4%E8%E7%E8%EA%E0.%20%D2%E5%F0%EC%EE%E4%E8%ED%E0%EC%E8%EA%E0/03_f/001.gif. |  |  |

Если какое-либо тело движется в газе, то оно сталкивается с молекулами газа и сообщает им импульс. С другой стороны, тело тоже будет испытывать соударения со стороны молекул, и получать собственный импульс, но направленный в противоположную сторону. Газ ускоряется, тело тормозится, то есть на тело действуют силы трения. Такая же сила трения будет действовать и между двумя соседними слоями газа, движущимися с разными скоростями. Это явление носит название***внутреннее трение*** или ***вязкость газа***, причём сила трения пропорциональна градиенту скорости:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%CC%EE%EB%E5%EA%F3%EB%FF%F0%ED%E0%FF%20%F4%E8%E7%E8%EA%E0.%20%D2%E5%F0%EC%EE%E4%E8%ED%E0%EC%E8%EA%E0/03_f/002.gif. |  | (3.1.1) |

Если в соседних слоях газа создана и поддерживается разность температур, то между ними будет происходить обмен тепла. Благодаря хаотическому движению, молекулы в соседних слоях будут перемешиваться и их средние энергии будут выравниваться. Происходит перенос энергии от более нагретых слоев к более холодным телам. Этот процесс называется***теплопроводностью***. Поток тепла пропорционален градиенту температуры:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%CC%EE%EB%E5%EA%F3%EB%FF%F0%ED%E0%FF%20%F4%E8%E7%E8%EA%E0.%20%D2%E5%F0%EC%EE%E4%E8%ED%E0%EC%E8%EA%E0/03_f/003.gif. |  | (3.1.2) |

В состоянии равновесия в среде, содержащей заряженные частицы, потенциал электрического поля в каждой точке соответствует минимуму энергии системы. При наложении внешнего электрического поля возникает неравновесное движение электрических зарядов в таком направлении, чтобы минимизировать энергию системы в новых условиях. Связанный с этим движением перенос электрического заряда называется ***электропроводностью***, а само направленное движение зарядов - электрическим током.

В процессе диффузии при теплопроводности и электропроводности происходит перенос вещества, а при внутреннем трении – перенос энергии. В основе этих явлений лежит один и тот же механизм – хаотическое движение молекул. Общность механизма, обуславливающего все эти явле**Закон вязкости (внутреннего трения)**[**Ньютона**](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D1%8C%D1%8E%D1%82%D0%BE%D0%BD,_%D0%98%D1%81%D0%B0%D0%B0%D0%BA) — математическое выражение, связывающее [касательное](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9A%D0%B0%D1%81%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BD%D0%B0%D0%BF%D1%80%D1%8F%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5&action=edit&redlink=1) [напряжение](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%BD%D0%B0%D0%BF%D1%80%D1%8F%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) внутреннего [трения](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) \tau ([вязкость](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C)) и изменение скорости среды v в пространстве \partial v / \partial n (скорость деформации) для текучих тел ([жидкостей](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%96%D0%B8%D0%B4%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) и [газов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B0%D0%B7)):

\tau = \eta \frac{\partial v}{\partial n},

где величина \eta называется коэффициентом внутреннего трения или [коэффициентом динамической вязкости](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) (единица [СГС](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%93%D0%A1) — [пуаз](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%83%D0%B0%D0%B7)); с физической точки зрения она представляет собой удельную силу трения при градиенте скорости, равном единице.

В технике, в частности, при расчёте [гидроприводов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D0%B4) и в [триботехнике](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%80%D0%B8%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0" \o "Триботехника), часто приходится иметь дело с величиной:

\nu = \frac{\eta}{\rho},

эта величина получила название [кинематической вязкости](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C), единица [СГС](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%93%D0%A1) — [Стокс](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%BE%D0%BA%D1%81_(%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%86%D0%B0_%D0%BA%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B9_%D0%B2%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8)). Здесь \rho — [плотность](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) среды; \eta — [коэффициент динамической вязкости](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C).

Закон Ньютона может быть получен аналитически и приёмами [физической кинетики](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BA%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0), где вязкость рассматривается обычно одновременно с [теплопроводностью](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) и соответствующим [законом Фурье для теплопроводности](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C). В [кинетической теории](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%80%D0%BD%D0%BE-%D0%BA%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F) **газов**коэффициент внутреннего трения вычисляется по формуле

\eta=\frac{1}{3}\left\langle u\right\rangle \left\langle \lambda \right\rangle \rho,

где \left\langle u\right\rangle — средняя скорость теплового движения молекул, \left\langle\lambda\right\rangle − средняя [длина свободного пробега](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0_%D1%81%D0%B2%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%B5%D0%B3%D0%B0).

ния переноса, приводит к тому, что их закономерности должны быть похожи друг на друга.

**Градие́нт** (от [лат.](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%8F%D0%B7%D1%8B%D0%BA) *gradiens*, род. падеж *gradientis* — шагающий, растущий) — [вектор](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80_(%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0)), своим направлением указывающий направление наибольшего возрастания некоторой величины \varphi, значение которой меняется от одной точки пространства к другой ([скалярного поля](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D1%8F%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5)), а по величине (модулю) равный быстроте роста этой величины в этом направлении.

Например, если взять в качестве \varphi высоту поверхности земли над уровнем моря, то её градиент в каждой точке поверхности будет показывать «направление самого крутого подъёма», и своей величиной характеризовать крутизну склона.

С математической точки зрения градиент — это [производная](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%A4%D1%80%D0%B5%D1%88%D0%B5) скалярной функции, определенной на векторном пространстве.

Пространство, на котором определена функция и её градиент, может быть, вообще говоря, как обычным трёхмерным пространством, так и пространством любой другой размерности любой физической природы или чисто абстрактным (безразмерным).

Термин впервые появился в метеорологии, а в математику был введён [Максвеллом](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%BB,_%D0%94%D0%B6%D0%B5%D0%B9%D0%BC%D1%81_%D0%9A%D0%BB%D0%B5%D1%80%D0%BA) в 1873 г. Обозначение *grad* тоже предложил Максвелл.

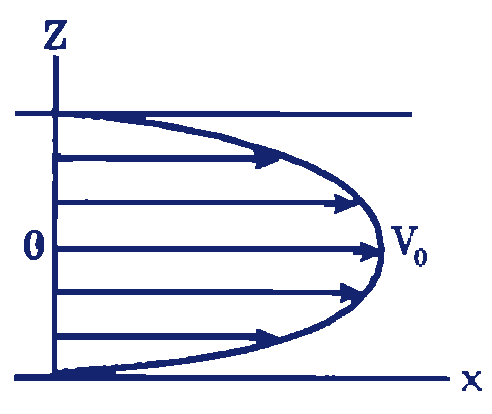
**Стандартные обозначения**:

\mathrm{grad}\,\varphi

или, с использованием [оператора набла](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80_%D0%BD%D0%B0%D0%B1%D0%BB%D0%B0),

\nabla \varphi

— вместо \varphi может быть любое скалярное поле, обозначенное любой буквой, например \mathrm{grad}\, V, \nabla V — обозначения градиента поля *V*.

Величина v/x  называется градиентом скорости и показывает, как быстро меняется скорость при перехо¬де от слоя к слою в направлении х, пер¬пендикулярном направлению движения слоев  
  
Сила вязкого трения *F*, действующая на жидкость, пропорциональна (в простейшем случае сдвигового течения вдоль плоской стенки[[1]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C#cite_note-1)) [скорости](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) относительного движения *v* тел, пропорциональна [площади](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%BE%D1%89%D0%B0%D0%B4%D1%8C) *S* и обратно пропорциональна расстоянию между [плоскостями](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%BE%D1%81%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_(%D0%B3%D0%B5%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%8F)) *h*:

\vec{F}\propto -\frac{\vec{v} \cdot S}{h} 

Коэффициент пропорциональности, зависящий от сорта жидкости или газа, называют **коэффициентом динамической вязкости**. Этот закон был предложен [Исааком Ньютоном](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D1%8C%D1%8E%D1%82%D0%BE%D0%BD,_%D0%98%D1%81%D0%B0%D0%B0%D0%BA) в 1687 году и носит его имя ([закон вязкости Ньютона](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%B2%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8_%D0%9D%D1%8C%D1%8E%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B0)). Экспериментальное подтверждение закона было получено в начале XIX века в опытах [Кулона](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%83%D0%BB%D0%BE%D0%BD,_%D0%A8%D0%B0%D1%80%D0%BB%D1%8C_%D0%9E%D0%B3%D1%8E%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BD_%D0%B4%D0%B5) с [крутильными весами](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D1%83%D1%82%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%B2%D0%B5%D1%81%D1%8B) и в экспериментах [Хагена](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B0%D0%B3%D0%B5%D0%BD,_%D0%93%D0%BE%D1%82%D1%82%D1%85%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D1%84_%D0%93%D0%B5%D0%BD%D1%80%D0%B8%D1%85_%D0%9B%D1%8E%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B3" \o "Хаген, Готтхильф Генрих Людвиг) и [Пуазёйля](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%83%D0%B0%D0%B7%D1%91%D0%B9%D0%BB%D1%8C,_%D0%96%D0%B0%D0%BD_%D0%9B%D1%83%D0%B8_%D0%9C%D0%B0%D1%80%D0%B8" \o "Пуазёйль, Жан Луи Мари) с течением воды в капиллярах[[2]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C#cite_note-2).

Качественно существенное отличие сил вязкого трения от [*сухого трения*](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5), кроме прочего, то, что тело при наличии только вязкого трения и сколь угодно малой внешней силы обязательно придет в движение, то есть для вязкого трения не существует [трения покоя](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D1%8F), и наоборот — под действием только вязкого трения тело, вначале двигавшееся, никогда (в рамках макроскопического приближения, пренебрегающего броуновским движением) полностью не остановится, хотя движение и буде**Динамическая вязкость**[[править](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%92%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C&veaction=edit&vesection=6) | [править вики-текст](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%92%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C&action=edit&section=6)]

Внутреннее трение [жидкостей](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%96%D0%B8%D0%B4%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C), как и газов, возникает при движении жидкости вследствие переноса импульса в направлении, перпендикулярном к направлению движения. Справедлив общий закон внутреннего трения — [закон Ньютона](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%B2%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8_%D0%9D%D1%8C%D1%8E%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B0):

\tau = - \eta \frac{\partial v}{\partial n},

Коэффициент вязкости \eta (коэффициент динамической вязкости, динамическая вязкость) может быть получен на основе соображений о движениях молекул. Очевидно, что \eta будет тем меньше, чем меньше время t «оседлости» молекул. Эти соображения приводят к выражению для коэффициента вязкости, называемому [уравнением Френкеля-Андраде](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%A4%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%B5%D0%BB%D1%8F-%D0%90%D0%BD%D0%B4%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B5&action=edit&redlink=1):

 \eta = C e^{w/kT}

Иная формула, представляющая коэффициент вязкости, была предложена [Бачинским](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B0%D1%87%D0%B8%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9,_%D0%90%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81%D0%B5%D0%B9_%D0%98%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%84%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87). Как показано, коэффициент вязкости определяется межмолекулярными силами, зависящими от среднего расстояния между молекулами; последнее определяется молярным объёмом вещества V_{M}. Многочисленные эксперименты показали, что между молярным объёмом и коэффициентом вязкости существует соотношение:

\eta = \frac{c}{V_{M}-b},

где с и b — константы. Это эмпирическое соотношение называется формулой [Бачинского](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B0%D1%87%D0%B8%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9,_%D0%90%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81%D0%B5%D0%B9_%D0%98%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%84%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87).

Динамическая вязкость жидкостей уменьшается с увеличением температуры, и растёт с увеличением давления.

Для капельных жидкостей вязкость зависит от температуры **t** и давления **Р**, однако последняя зависимость проявляется только при больших изменениях давления, порядка **нескольких десятков МПа**.

Зависимость коэффициента динамической вязкости от температуры выражается формулой вида:

Image

где  **јt** – коэффициент динамической вязкости при заданной температуре,

