

Slasten Michail Ivanovitch – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: lina@mvs.tsure.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371663; the department of physics, cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 533.16

А.В. Палий, Е.Т. Замков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗА КАК НЕВЯЗКОГО ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВАНИИ УТВЕРЖДЕНИЙ ГЕЛЬМГОЛЬЦА И НЬЮТОНА

Рассмотрены определения вязкости газов (воздуха), приводимые в литературе. На основании утверждений Гельмгольца и Ньютона сделан вывод об отсутствии в газах вязкости. Утверждение Гельмгольца – это следствие того факта, что в отсутствие вязкости момент количества движения объема газа или жидкости измениться не может. Также этот вывод очевиден и из закона Ньютона – любое тело, в том числе и молекула, движется прямолинейно, если на него не действует сила. Делается вывод, что для газа его молекулы имеют массу, и, следовательно, они, согласно закону всемирного тяготения, притягиваются друг к другу, т.е. имеют силу или энергию связи. В этом смысле газ конечно вязкий. Но эти силы столь малы, что говорить о них с точки зрения инженерных прикладных задач не имеет никакого смысла.

Вязкость; трение; уравнения Гельмгольца; Ван-дер-Ваальсовы силы; Броуновская частица.

A.V. Paliy, E.T. Zamkov

DETERMINATION THE GAS AS A NON-VISCOUS MATTER ON THE BASIS OF REPRESENTATIONS HELMHOLTS AND NEWTON

Given in literature the determination of gases (air) viscosity is considered in this article. On the basis of Gelmgolts and Newton's statements the conclusion about viscosity absence in gases was received. The Gelmgolts's statement is the consequence of the fact that when the viscosity absents the movement quantity moment of the gas volume or liquid can't change. Also this conclusion is obvious from Newton's law. It is indicated that any body such as the molecule will move rectilinearly if the force doesn't act. Within the Terrestrial gravitation it is possible to speak only about connection energy the air molecules with Earth.

Viscosity; friction; the Gelmgolts's equations; the force of Van-der-Vaals; Brown particle.

Понятие вязкости и ее определение одной из важнейших в аэродинамике. Существенную роль во многих явлениях аэродинамики играют силы так называемого вязкого трения. Они приводят к возникновению циркулирующих потоков воздуха вокруг крыла самолета или вокруг вращающегося тела, к появлению силы сопротивления среды и т.д.

Научного определения вязкости как такового в литературе нет. Если, конечно, не считать за определение, к примеру, следующие высказывания. Вязкость газов (предметный указатель [1], переписано дословно: «Явление внутреннего трения (вязкости) связано с возникновением сил трения между двумя слоями газа или жидкости, перемещающимися параллельно друг другу с различными по величине скоростями...». Недоопределенный термин вязкости, по сути, заменяется термином трение. Однако, в соответствии с силами Ван-дер-Ваальса, молекулы газа не приближаются друг к другу на такое расстояние, чтобы можно было «потереться» (рис. 1). Особенность газа, с которой связаны и его свойства, заключается в том, что его молекулы находятся на большом удалении друг от друга и каждая молеку-

ла с динамической точки зрения изолирована от других молекул в течение большого промежутка времени между взаимодействиями. При температуре 0°C и давлении в одну атмосферу число молекул в одном кубическом сантиметре газа равно $2,69 \cdot 10^{19}$ (оно называется числом Лошмидта. Но если увеличить размер молекулы до размера теннисного мяча, то, например, в комнате их будет всего несколько штук [2]. Основные свойства твердых тел, жидкостей и газов непосредственно связаны с их молекулярной структурой и с природой сил, действующих между молекулами. В этом можно убедиться, рассматривая в общем виде силу, действующую между двумя типичными изолированными молекулами в зависимости от расстояния между ними. При малых расстояниях d (порядка 10^{-8} см) между центрами простых молекул между ними действуют интенсивная сила квантовой природы, притяжение или отталкивание, в соответствии с возможностью обмена электронными оболочками молекул. Если такой обмен возможен, то возникает сила притяжения, и она составляет основу химической связи; если обмен невозможен, то действует сила отталкивания, которая очень быстро уменьшается с увеличением расстояния между молекулами. При больших расстояниях между центрами молекул, например порядка 10^{-7} или 10^{-6} см, между ними действует слабая сила притяжения, при этом предполагается, что молекулы неионизированы, как это и бывает при обычных температурах. Эта сила уменьшается сначала как d^{-7} и в конце концов как d^{-8} , когда величина расстояния d велика. Грубо говоря, можно считать, что это происходит вследствие электрической поляризации одной молекулы под влиянием другой [2]. График силы взаимодействия двух молекул, между которыми нет химической связи, в зависимости от расстояния d имеет вид, изображенный на рис. 1.

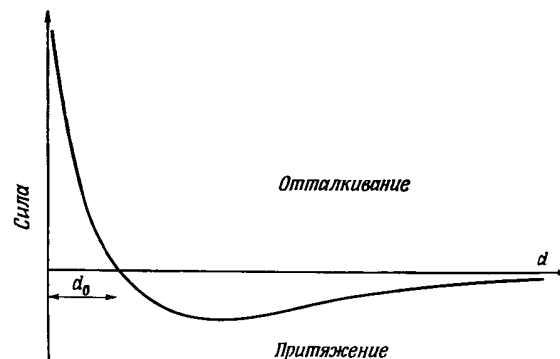


Рис. 1. Зависимость силы взаимодействия молекул от расстояния d между их центрами

На расстоянии d_0 , при котором сила взаимодействия изменяет знак, одна молекула по отношению к другой, очевидно, находится в положении устойчивого равновесия. Величина d_0 для большинства простых молекул имеет порядок $3 \div 4 \cdot 10^{-8}$ см. Зная массу молекул и плотность соответствующего вещества, можно рассчитать среднее расстояние между центрами соседних молекул. Для веществ, состоящих из простых молекул, расчет показывает, что среднее расстояние между ними в газообразной фазе при нормальных температуре и давлении

имеет порядок $10d_0$, а для молекул в жидкой и твердой фазах – порядок d_0 . Поэтому в газах при обычных условиях молекулы находятся на таком большом расстоянии друг от друга, что между ними действуют чрезвычайно слабые силы притяжения, за исключением редких случаев, когда две молекулы оказываются близкими [2]. Таким образом молекулы газа, в отличие от твердого и жидкого состояния вещества, теряют способность к притяжению (к привязыванию или к вязкости), связи между ними рвутся.

Очевидно, что наибольшей вязкостью обладают твердые вещества. Среди них есть также более или менее вязкие. С повышением температуры вязкость падает и наступает переход в жидкое состояние – вязкость падает еще сильнее. Вязкость у различных жидкостей при различных температурах различна. Подобным образом можно рассуждать до бесконечности, в конце концов, вязкость может зависеть от чего угодно, но без определения вязкости все это не имеет смысла. Но о каком тогда веществе можно сказать, что оно невязкое?

Впрочем, определение вязкой среде дал Гельмгольц, да и из Ньютона оно очевидно, хотя ввиду красивой простоты, часто забывается.

Гельмгольцем были сформулированы теоремы, описывающие физическое содержание трех уравнений (1–3) потока несжимаемой жидкости при наличии завихренности $\bar{\Omega}$ [3].

Уравнения потока жидкости при наличии завихренности имеют вид

$$\bar{\Omega} = \nabla \times \bar{v}, \quad (1)$$

$$\frac{d\bar{\Omega}}{dt} + \nabla \bar{x}(\bar{\Omega} \times \bar{v}) = 0. \quad (2)$$

Для несжимаемой жидкости добавляется дополнительное уравнение:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{v} = 0. \quad (3)$$

Физический смысл этих уравнений был описан Гельмгольцем в трех теоремах. Уравнение (1) – дивергенция $\bar{\Omega}$ всегда равна нулю (дивергенция ротора всегда нуль). Таким образом, вихревые линии подобны линиям электромагнитного поля \bar{B} , они нигде не начинаются, нигде не кончаются, и всегда стремятся замкнуться.

Уравнение (2) – это обычный закон сохранения момента импульса. Если в некотором вихревом потоке мы выделим некий объем, например в виде цилиндра площадью S и длиной L , то через некоторое время этот объем, который двигался вдоль оси цилиндра со скоростью v и вращался с частотой Ω , окажется в другом месте. В соответствии с Гельмгольцем $\Omega S = \Omega_1 S_1$ (рис. 2).

По сути, уравнения Гельмгольца – это уравнения сохранения энергии для вращательного движения. При нулевой вязкости все силы на поверхности любого объема в подобном веществе (газе или жидкости) будут перпендикулярны поверхности этого объема. Силы давления, которые перпендикулярны поверхности, могут изменить форму объема, но без тангенциальных сил величина момента количества движения нашего объема измениться не может.

Таким образом, уравнение (2) говорит нам, что в отсутствии вязкости, если завихренность отсутствовала первоначально, то она уже и не появится ни при каких обстоятельствах.

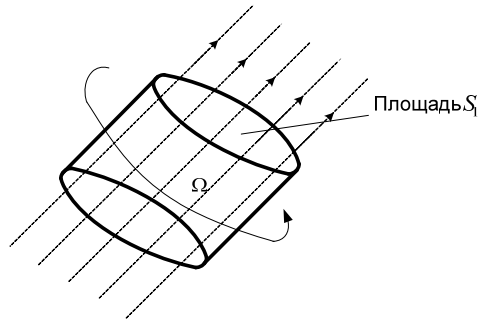


Рис. 2. Выделенный объем потока в виде цилиндра

Выделим в потоке жидкости цилиндр, ось которого будет параллельна вихревым линиям.

Спустя некоторое время тот же объем жидкости будет находится уже в другом месте. Этот объем будет также иметь форму цилиндра, но может менять диаметр, или ориентацию (рис. 3).

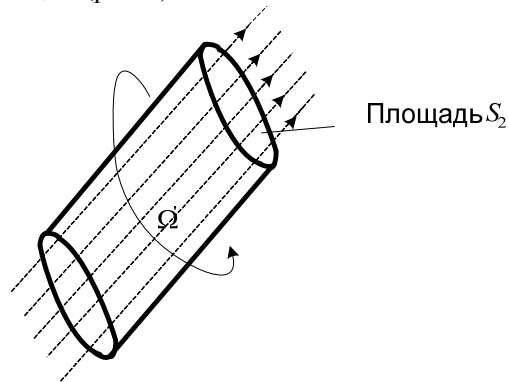


Рис. 3. Возможная смена диаметра и ориентации того же объема

При изменении диаметра длина цилиндра тоже должна будет измениться так, чтобы объем цилиндра остался прежним (поскольку мы считаем жидкость несжимаемой) [3]. Кроме того, поскольку вихревые линии связаны с веществом, их плотность увеличивается обратно пропорционально уменьшению площади поперечного сечения цилиндра. Произведение завихренности Ω на площадь цилиндра S будет оставаться постоянной, так что в соответствии с Гельмгольцем получается

$$\Omega_2 S_2 = \Omega_1 S_1. \quad (4)$$

При нулевой вязкости все силы на поверхности нашего цилиндрического объема (впрочем, как и любого другого объема в этом веществе) перпендикулярны поверхности. Силы давления могут заставить его изменить форму, но без тангенциальных сил, величина момента количества движения жидкости внутри измениться не может. Момент количества движения жидкости внутри маленького цилиндра равен произведению его момента инерции I на угловую скорость жидкости, которая пропорциональна завихренности Ω . Момент же инерции цилиндра пропорционален mr^2 . Поэтому из закона сохранения момента количества движения получим

$$(M_1 R_1^2) \Omega_1 = (M_2 R_2^2) \Omega_2. \quad (5)$$

Но масса будет одной и той же ($M_1 = M_2$), а площадь пропорциональна R^2 , и мы опять возвращаемся к (4).

Таким образом, утверждение Гельмгольца, которое эквивалентно выражению (5), это следствие того факта, что в отсутствие вязкости момент количества движения объема жидкости измениться не может.

Собственно говоря, этот вывод очевиден и из закона Ньютона – любое тело, в том числе и молекула, движется прямолинейно, если на него не действует сила.

В литературе [1] силы трения или вязкости описываются как результат движения двух параллельно перемещающихся слоев газа (рис. 4).

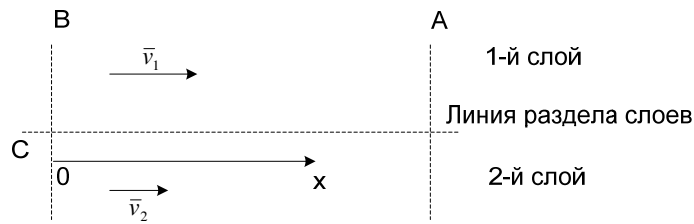


Рис. 4. Два параллельно перемещающихся слоя газа

Для того чтобы от линии B до линии A было движение среды, или существовал поток, необходимо чтобы между линиями A и B существовала разность давлений ΔP_1 . То же самое должно быть и для второго слоя, но так как там скорость ниже, то и давление ΔP_2 должно быть меньше ΔP_1 . Предположим, что по линии B давления в слое 1 и в слое 2 равны, и равны P_0 , тогда на некотором расстоянии x от линии B в слое 1 давление будет $P_1 = P_0 - \frac{\Delta P_1 x}{S}$, где S – расстояние

между A и B , а $P_2 = P_0 - \frac{\Delta P_2 x}{S}$. В точке x возникает разность давлений между

двумя слоями $\Delta P_x = \frac{(\Delta P_1 - \Delta P_2)x}{S}$. Это означает, что в среде может существовать

два описанных выше потока, если они полностью независимы друг от друга, к примеру, находятся на большом расстоянии друг от друга. В описываемом примере, в точке x , впрочем и в любой другой, поперек линии раздела слоев возникает поток, перпендикулярный двум параллельным потокам, и возникает, согласно принципу наименьшего времени, или принципу суперпозиции, некий совершенно новый поток, сложенный из двух.

Создание некоторого подобия вышеописанного потока (рис. 4) возможно, если рассматривать не два отдельных потока, а некую смесь, или альянс потока и твердого тела. В этом случае, так как на поверхности тела скорость потока всегда равна нулю (из-за того, что молекулы потока, сталкиваясь с телом, теряют составляющую потока), т.е. отскакивают в произвольных направлениях – приобретают температурную составляющую (нагреваются). В этом случае подобных слоев можно выделить бесконечное множество, но все они будут не параллельны друг другу. Поскольку существует разность температур и соответственно давлений между слоями, этим и определяется их взаимодействие. Никакое трение или вязкость ни при чем [4, 5].

Согласно закону Ньютона молекула газа движется по ломаной прямой от столкновения до столкновения. При количестве столкновений n , стремящемся к бесконечности, мы уже получим кривую линию. Поэтому при достаточной плотности и достаточно больших расстояниях, мы можем пользоваться математическим понятием кривой или понятием ротора, позволяющих нам легко описывать циркуляцию потоков. Но забывать о том, что это только лишь приближение, удобное нам, нельзя, так как это приводит к неправильным выводам. Мы легко оперируем понятием потока газа и направляем линии тока по кривым, огибающим тело. Но ни одна молекула газа по этой кривой не полетит.

Если конечно в газе поместить легкие частички, видимые глазом (Броуновские), например частички дыма, то мы можем наблюдать их движение по дуге, или криволинейной траектории (рис. 5).



Рис. 5. Дым от сигареты

Возможно смесь дыма или пыли и воздуха обладает вязкостью? Увы, нет. Если мы понаблюдаем за частичкой под микроскопом, например за центром масс частички, то увидим, что центр масс частички движется по ломаной линии, и мы нигде не увидим движения по дуге.

Точно так же ведет себя и отдельно взятая молекула газа – движется от столкновения до столкновения по ломаной линии (рис. 6).

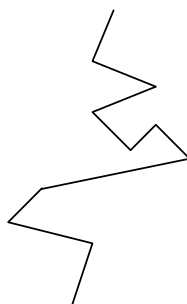


Рис. 6. Траектория движения молекулы газа от столкновения до столкновения

При нахождении среднего значения траекторий n молекул изломов будет практически в n раз больше (рис. 7).

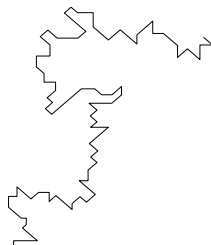


Рис. 7. Среднее значение траекторий n молекул

Если, к примеру, перекачивать газ по трубке, то вполне естественно, что стенки трубки придадут газу направление движения. И мы нарисуем линии тока газа (рис. 8).

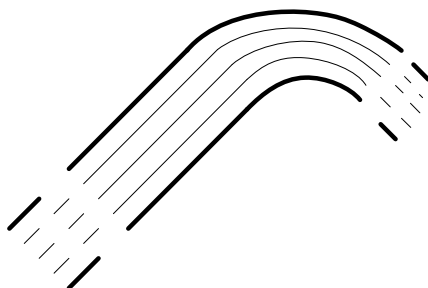


Рис. 8. Линии тока газа в трубке

Если запустить одну молекулу газа, то (рис. 9).

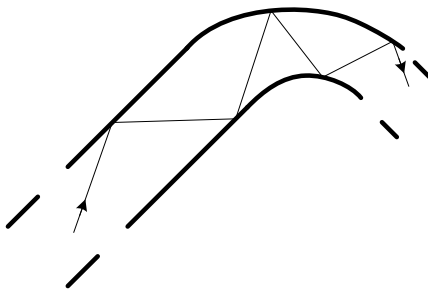


Рис. 9. Траектория движения молекулы газа в трубке

Но из-за неровностей стенок трубки траектория движения молекулы будет еще более сложная, но тем не менее это будет ломанная линия. Если молекул будет две, будет две ломаные линии. Для n молекул – n ломаных линий.

Понятием линии тока конечно можно пользоваться, так как оно и придумано для удобства использования, но забывать о том, что это всего лишь приближение, нельзя.

Для газа, скажем так, понятно, что молекулы газа имеют массу, и, следовательно, они, согласно закону всемирного тяготения, притягиваются друг к другу, т.е. имеют силу или энергию связи. В этом смысле газ конечно вязкий. Но эти силы столь малы, что говорить о них с точки зрения инженерных прикладных задач не имеет никакого смысла.

Если молекулы газа предоставить самим себе, лишить притяжения Земли, то они мгновенно разлетятся в различных направлениях. В пределах Земного притяжения можно говорить лишь об энергии связи молекул воздуха с Землей. Только благодаря ей воздух удерживается и вращается вместе с Землей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Холодовский Г.Е.* Краткий физико-технический справочник. – М.: Государственное изд-во физ.-мат. литературы, 1962.
2. *Дж. Бэтчелор.* Введение в динамику жидкости / Под ред. Г.Ю. Степанова. – М.: Мир, 1973.
3. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. – М.: Мир, 1977.
4. *Палий А.В., Замков Е.Т., Булейко В.Г.* Механизм создания сопротивления плоской поверхности в газовом потоке тангенциальной составляющей скорости молекулы газа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1 (126). – С. 186-191.
5. *Палий А.В., Замков Е.Т., Серба П.В.* Определение толщины пограничного слоя при обтекании тела аэродинамическим потоком методом электростатической аналогии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1 (126). – С. 19-196.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Жорник.

Палий Александр Викторович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: A.V._Paliy@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371603; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; доцент.

Замков Евгений Терентьевич – e-mail: Zamkov42@mail.ru; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; доцент.

Paliy Alexander Viktorovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: A.V._Paliy@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; cand. of eng. sc.; associate professor.

Zamkov Evgeniy Terent'evich – e-mail: Zamkov42@mail.ru; the department of electronic apparatuses design; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 533.6.01

А.В. Палий, Е.Т. Замков

МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛА В ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

Рассматривается механизм возникновения трения.

Объясняется механизм увеличения сопротивления тела в газовом потоке при увеличении его длины в отличие от существующего объяснения вязкостью газа.

Приводится объяснение роста объема возмущенной среды с ростом длины тела, что дополнительно увеличивает сопротивление.

Приводится объяснение экспериментального факта равенства нулю потоковой составляющей скорости газа на поверхности твердого тела.

Приводится объяснение роста объема возмущенной среды с ростом длины тела, что дополнительно увеличивает сопротивление.

Делается вывод, что механизм трения между двумя твердыми телами такой же как и между твердым телом и газом, но к нему еще добавляются Ван-дер-Ваальсовы силы и механические зацепы из-за неровностей на поверхности.

Газовый поток; сопротивление тела; обтекание; поверхность тела; объем возмущенной среды.