

О ПРОТИВОРЕЧИВОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ДИНАМИЧЕСКАЯ И КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ

А. С. Чувев,

доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н. Э. Баумана,
кандидат технич. наук

В статье анализируются смысловые логические и физико-метрологические противоречия, присутствующие в используемых определениях физических величин: динамическая вязкость и кинематическая вязкость. Предлагаются пути разрешения этих противоречий.

*Истина бытия – это сущность,
истина сущности – есть понятие.
Гегель*

В физике используют два понятия для обозначения физических величин, именуемых термином *вязкость*. *Вязкость динамическая*, именуемая также *коэффициентом вязкости* или *коэффициентом внутреннего трения* [1], и *вязкость кинематическая*.

Размерность первой физической величины в системе СИ имеет вид:

$$\dim \eta = L^{-1}MT^{-1}. \quad (1)$$

Динамическая вязкость в книге А. Г. Чертова [1] определяется как *сила* внутреннего трения при единичных значениях *градиента скорости* $\Delta u / \Delta l$ и *площади* ΔS поверхностного слоя, на которую рассчитывается сила внутреннего трения:

$$\eta = \frac{F}{\frac{\Delta u}{\Delta l} \cdot \Delta S}. \quad (2)$$

Имеется иное определение *динамической вязкости* – как тангенциального напряжения τ , возникающего в ламинарном потоке жидкости или газа при разности скоростей слоев 1 м/с, находящихся на расстоянии 1 м по нормали к направлению скорости [2]. Определяющее уравнение для такого определения динамической вязкости следующее:

$$\eta = \tau / \text{grad } u = \tau / [(u_2 - u_1) / l]. \quad (3)$$

Единицей измерения динамической вязкости является паскаль-секунда (Па·с).

Вроде бы – все тоже самое. *Сила*, деленная на *площадь*, есть *напряжение*, в данном случае, *касательное*. Однако при трактовке направления сил или ориентации в пространстве касательных напряжений, характеризующих проявление *динамической вязкости* (сокращенно *вязкости* [2, стр.91]), возникают очевидные недоразумения.

Наиболее ярко это проявляется при попытках представить силовое взаимодействие слоев вязкой среды как процесс, в ходе которого от одного слоя к другому передается в единицу времени *импульс*, по величине равный *силе* [3, стр. 403]. Направление этого импульса и иногда силы вязкого трения (преподносимой в учебниках не очень вразумительно) считается перпендикулярным (!?) направлению течения потока жидкости или газа. Такую трактовку вязкости приписывают И. Ньютону.

С напряжением (не только касательным), возникающим между разнородными слоями движущейся среды, следует согласиться.

В этом случае возникает хорошо известное давление (согласно уравнению Бернулли) и сила влечения, имеющая поперечное направление к основному движению вязкой среды.

Но ведь сила вязкого трения, о которой мы говорим, это другая сила. Она всегда будет направлена против движения – это понятно даже ребенку. Потом, о каком *импульсе*, перпендикулярном движению, можно говорить, если боковая *сила* неизменна во *времени*. Например, книга, неподвижно лежащая на столе, оказывает на него силовое давление. Но мы же не говорим о непрерывном потоке импульса от книги к столу. Это будет явный бред.

Уравнение, описывающее оспариваемый здесь боковой поток *импульса*, который по определению равен произведению *силы* на *время* – $(F \times t)$ или *массы* на *скорость* – $(m \times u)$, имеет вид [4, формула (6.11)]:

$$j_p = -\eta \frac{du}{dx}, \quad (4)$$

где j_p – импульс, передаваемый ежесекундно от слоя к слою через единицу площади поверхности, то есть *плотность потока импульса* (здесь и далее в абзаце цитируем учебник Иродова). «Знак минус обусловлен тем, что поток импульса противоположен по направлению градиенту du/dx (рис. 6.5). На рисунке показаны силы, действующие в плоскости площадки S : левая f – сила, с которой действуют слои справа от площадки S (они движутся в данном случае быстрее), правая f – сила, с которой действуют слои слева от S . Эти силы взаимно противоположны и одинаковы по модулю. Вопрос, куда действует сила в плоскости S , не имеет смысла, пока не указано, со стороны каких слоев на какие».

Иллюстрация из книги Иродова приведена на рис.1.

Анализируя этот рисунок и его описание невозможно не заметить противоречий. Во-первых, нельзя говорить о боковом потоке импульса, если в этом направлении нет никакого движения вязкой среды. Во-вторых,

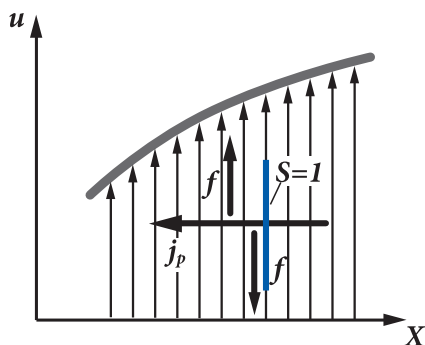


Рис. 1. Иллюстрация из книги Иродова

если показанные на рисунке силы действуют в одной плоскости, противоположны и равны, то в сумме они никак не могут препятствовать направленному течению вязкой среды. В третьих, векторы сил и плотности потока импульса показаны взаимно перпендикулярными, что противоречит первоначальному утверждению об их взаимной обусловленности, а показанное направление потока импульса противоположно действию силы давления, направленной всегда в сторону больших скоростей потока.

Не менее загадочное объяснение вязкости приведено в физическом справочнике [5, стр.364]. Цитируем: «вязкость тел η_{xy} определяется соотношением Ньютона:

$$F_x = -\eta_{xy} \nabla u_y,$$

связывающим силу внутреннего трения F_x , которая действует на единичную площадку в направлении, противоположном градиенту скорости течения вязкого вещества (газа, жидкости), с градиентом скорости ∇u_y . Если рассматриваемый объем, заполненный текучим веществом, не имеет выделенных направлений, которые могут быть обусловлены либо наличием внешних полей, либо преимущественной ориентацией частиц вещества, все компоненты тензора вязкости равны друг другу и вязкость является скаляром».

Не вдаваясь в разбор достаточно сложного понятия «тензор вязкости», определяемого из условий трехмерного векторного полевого представления распределения скоростей среды [6] и не оспаривая скалярного представления вязкости,

рассмотрим приведенное пояснение на соблюдение элементарной логики. Данное пояснение можно понимать двояко.

Первый вариант: градиент модуля скорости течения вязкого вещества направлен по оси y , то есть поперек направления течения вещества, а сила внутреннего трения F_x направлена по оси x , то есть против направления течения. Но этому противоречит фраза о том, что сила действует на единичную площадку в направлении, противоположном градиенту скорости.

Второй возможный вариант понимания этого объяснения: градиент модуля скорости направлен по оси y , то есть поперек направления течения вещества, сила внутреннего трения направлена противоположно обозначенному градиенту скорости, то есть тоже поперек направления вязкого течения, но тогда как понимать обозначение действия силы по оси x ? Элементарная логика не соблюдается. Отметим, что в расчетных задачах по физике сила вязкого трения всегда считается направленной противоположно течению вязкой среды.

В общем, путаница с объяснением сил вязкого трения – полнейшая.

Берем еще один источник – физическая энциклопедия [7, том 1, стр.373]. Здесь коэффициент сдвиговой вязкости определяется как коэффициент пропорциональности между скоростью деформации сдвига $\dot{\gamma} = \frac{d\epsilon}{dt}$ (ϵ – относительная деформация сдвига, t – время деформации) и возникающим при этом касательным вязком напряжении $\sigma_{\text{вяз}} = \eta \cdot \dot{\gamma}$.

И опять поясняется со ссылкой на И. Ньютона, что коэффициент сдвиговой вязкости (вязкости) равен импульсу, переносимому в единицу времени через единицу площади при единичном значении скорости относительной деформации сдвига.

Относительная деформация сдвига и время деформации – величины чрезвычайно неудобные для измерения и расчетов, однако

это, на наш взгляд, никак не может служить основанием для введения мифического явления переноса импульса, якобы порождающего силу, перпендикулярную этому импульсу.

Достаточно простое и логически связанное объяснение вязкости (без привлечения представления о боковом потоке импульса) приводится в учебном пособии Т.И. Трофимовой [8]. «При перемещении одних слоев реальной жидкости относительно других возникают силы внутреннего трения, направленные по касательной к поверхности слоев. Действие этих сил проявляется в том, что со стороны слоя, движущегося быстрее, на слой, движущийся медленнее, действует ускоряющая сила. Со стороны же слоя, движущегося медленнее, на слой, движущийся быстрее, действует тормозящая сила».

При равномерном течении вязкой жидкости эти силы, очевидно, должны быть равны, а само течение происходит благодаря сторонним силам или силам инерции и гравитации (явление растекания по поверхности). Иллюстрация из книги Трофимовой приведена на рис.2.

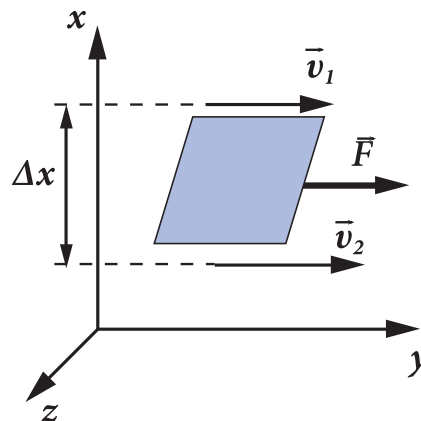


Рис.2. Иллюстрация из книги Трофимовой.

На данном рисунке изображение тоже не совсем понятно. Вопреки объяснению изображается только одна из сил, направленная по ходу течения вязкой жидкости, причем приложена она к середине выделенной площадки. Чем эта выделенная площадка отличается от соседних

площадок, к которым якобы приложена противодействующая сила, не поясняется.

Недостатком этой и других подобных иллюстраций механизма действия вязкости, по мнению автора, является оперирование с понятиями выделенной *площади* и *сил*, а не выделенного *объема* и *давления* в нем, что было бы правильнее и точнее. К тому же в элементарном описании вязкости не используется представление о вихревой (роторной) составляющей в движущемся потоке, что неизбежно имеет место при поперечном *градиенте скоростей*.

Не меньше логических противоречий встречается при описании другой физической величины – *кинематической вязкости*, обозначаемой буквой – ν [2].

Определяющим уравнением для кинематической вязкости считается отношение динамической вязкости η среды к ее плотности ρ :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (5)$$

Кинематическая вязкость по размерности представляет собой произведение *скорости* на *длину*:

$$\dim \nu = L^2 T^{-1}. \quad (6)$$

В русском языке понятие *вязкость* ассоциируется с понятиями *густота* и *сгущение*. Чем больше значение вязкости – тем больше сгущение среды и тем труднее ей самой течь или внутри нее двигаться. Это вполне очевидно. Однако если анализировать размерность кинематической вязкости, представляющую собой произведение *скорости* на *длину* (пространственную протяженность), то возникает логическое противоречие – большему значению кинематической *вязкости* соответствуют большие значения *скорости* и *длины*, а по сути (по смыслу) этого понятия должно быть наоборот.

С величиной *кинематическая вязкость* по размерности совпадает другая физическая величина, именуемая *коэффициентом диффузии* и обозначаемая буквой – D .

Коэффициент диффузии связывает *плотность потока массы* j_m с *градиентом объемной плотности* ρ в законе Фика [3, стр.402; 4, стр.176]:

$$j_m = -D \frac{d\rho}{dx}. \quad (7)$$

Здесь с логикой дела обстоят значительно лучше. Чем больше *коэффициент диффузии* – тем больше *скорость* распространения неоднородностей среды и тем *длиннее* их путь распространения за одно и то же время. По смыслу *коэффициент диффузии* сродни понятию *проницаемость*, чем больше этот коэффициент, тем больше скорость распространения (рассасывания) неоднородностей среды. Заметим, что *проницаемость* и *вязкость* понятия прямо противоположные. Понятию *вязкость* противоположен и хорошо понятный термин *текучесть*.

Таким образом, из всех используемых терминов для наименования физической величины с размерностью $\dim \nu = L^2 T^{-1}$, именуемой до сих пор *кинематической вязкостью*, наиболее подходят термины *проницаемость* или *текучесть*. Первый термин более общий, поэтому его применение будет предпочтительнее.

Наконец, самым убедительным доводом в оправдание необходимости смены используемого названия *кинематическая вязкость*, является тот факт, что этот параметр для газов значительно больше, чем для жидкостей – разница больше порядка (отличие в среднем на 15) [10]. То, что *вязкость* газов значительно меньше *вязкости жидкостей*, а соотношение *проницаемостей* – прямо противоположное, может оспаривать только умалишенный.

Теперь снова обратимся к понятию *динамическая вязкость* (далее просто *вязкость*). Согласно нашему предложению, если его реализовать, *вязкость* будет представлять собой произведение *плотности* среды на ее *проницаемость*. Но вполне очевидно, что эти два параметра по своему влиянию на *вязкость* должны быть прямо противоположны. Из опыта

известно: чем больше *плотность* – тем больше *вязкость* и чем больше *проницаемость* – тем меньше *вязкость*. Как объяснить возникающее противоречие? Объяснения вполне возможны.

Во-первых, возможно, что вклад этих двух составляющих не одинаков и влияние *плотности* на *вязкость* превалирует над влиянием *проницаемости*.

Во-вторых, вполне возможно дать определение *вязкости* и без привязки его к *проницаемости*. Для иллюстрации этого привлечем к анализу авторскую систему физических величин и закономерностей [8], представленную в части механических величин (рис.3).

На рисунке приведены отдельные системные взаимосвязи *вязкости* (динамической) с *коэффициентом диффузии*, который здесь предложено называть *проницаемостью*, с *плотностью потока импульса* (давлением) и другими величинами.

Из приведенного рисунка и поясняющей на нем надписи видно, что *плотность потока импульса* по размерности совпадает с *давлением* – величиной скалярной. Если в формуле (4) взамен *плотности потока импульса* использовать физическую величину *давление*, то всякие недоразумения, связанные с определением направленности действующих в вязкой среде *сил* и *импульсов*, исчезают.

Давление – величина скалярная и всякие рассуждения о направленности давления не имеют смысла. Правда, в гидродинамике есть представление о кинетическом давлении в виде половины произведения *объемной плотности массы* на квадрат *линейной скорости*, но к описанию механизма медленной *текучести* вязких сред оно явно неприменимо.

На рисунке 3 один из выделенных параллелограммов (красный пунктир) иллюстрирует системную закономерность, выражающую силу сопротивления вязкой среды по методу Стокса [6, стр.54]:

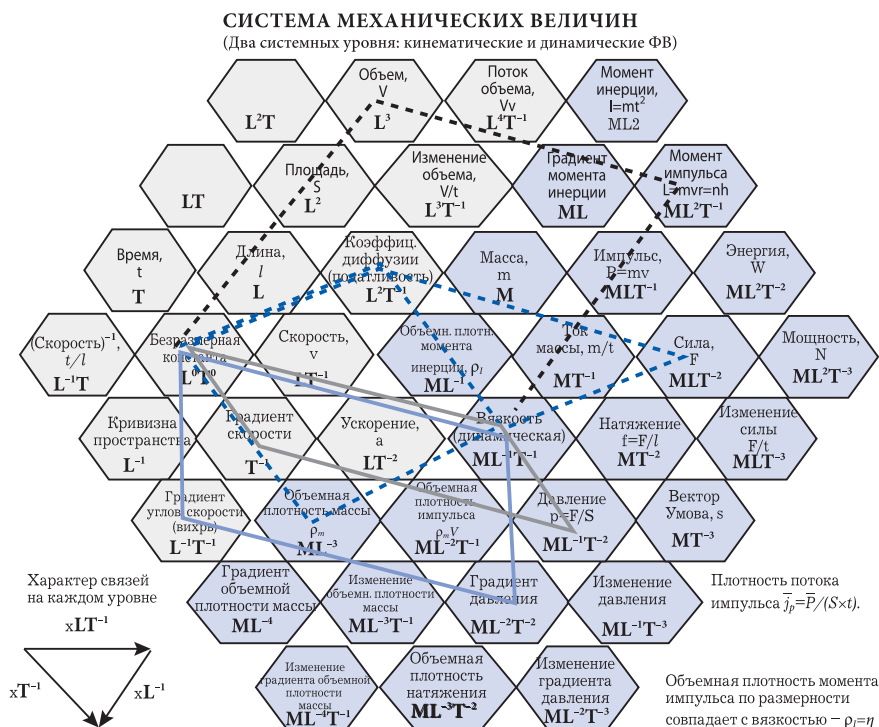


Рис. 3. Вязкость в системе механических физических величин

$$F = 6\pi\eta r u, \quad (8)$$

где: η - вязкость среды; ρ - радиус сферического тела, движущегося в вязкой среде, u - скорость движения этого тела.

В выражении (8) произведение $\pi r u$, возможно, с числовым коэффициентом 6π будет определять величину, которую здесь предлагается называть *проницаемостью*. Обозначим ее также как и *кинематическую вязкость* – ν . Числовое значение шесть пи можно трактовать как шесть возможных направлений выделенного трехмерного пространства, в котором действует *проницаемость* и обнаруживается действие *вязкости*.

Возможному определению *вязкости* η как отношению *силы* вязкого трения F к *проницаемости* ν :

$$\eta = \frac{F}{\nu}, \quad (9)$$

имеется вполне разумное объяснение. При нулевом значении *проницаемости* вязкость будет бесконечно большой, а при бесконечно большой *проницаемости* вязкость равна нулю.

По рисунку 3 можно определить, что *вязкость* по размерности совпадает с *объемной плотностью момента импульса*. Это говорит о том,

что *вязкость* определяется не только *проницаемостью* или *градиентом скорости* ламинарного течения среды, но также определяется и турбулентностью этой среды. Турбулентность характеризуется наличием вихревых структур. Если *градиент угловой скорости* обозначить – ξ , то возможно еще одно определяющее уравнение для *вязкости* (может быть, турбулентной составляющей *вязкости*). Оно, по идее, должно иметь такой вид:

$$\eta = \frac{\text{grad } p}{\xi}. \quad (10)$$

При отсутствии турбулентности, то есть ламинарном течении вязкой жидкости, выражение (10) будет, очевидно, таким:

$$\eta = \frac{p}{\text{grad } u}. \quad (11)$$

Для случая ламинарного течения вязкой среды уравнение (4), с учетом сказанного выше, очевидно можно представить так:

$$p = -\eta \frac{du}{dx}. \quad (12)$$

Знак минус в этом уравнении означает, что давление в области движения вязкой среды более низкое. Поскольку давление все направленно, оно проявляет себя

в виде статической боковой силы, направленной внутрь движущегося потока жидкости или газа. Это давление хорошо известно, оно входит в уравнение Бернулли.

Уравнение Бернулли без участия перепада высот имеет вид [3, стр.249]:

$$\frac{\rho u_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho u_2^2}{2} + p_2. \quad (13)$$

Последнее выражение можно преобразовать:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = -\frac{\rho}{2}(u_2^2 - u_1^2). \quad (14)$$

Объединя выражения (12) и (14) можем записать:

$$\Delta p = -\eta \frac{du}{dx} = -\frac{\rho u^2}{2}, \quad (15)$$

где u – относительная скорость соседних слоев жидкости или газа, а x – направление, поперечное скорости u .

Решая дифференциальное уравнение (15) разделением переменных:

$$\frac{du}{u^2} = -\frac{\rho}{2\eta} dx. \quad (16)$$

При постоянном значении плотности ρ , получаем вот такой результат:

$$\frac{1}{u \cdot x} = \frac{\rho}{2\eta}. \quad (17)$$

Это соотношение, очень похоже на коэффициент диффузии, и есть *проницаемость*:

$$\nu = u \cdot x = 2\eta/\rho. \quad (18)$$

Обратим внимание на то, что в выражении (18) линейный размер x – это размер, поперечный направлению скорости, а в коэффициенте диффузии этот размер представлен длиной свободного пробега молекул, которая подразумевается совпадающей с направлением скорости.

Возвратимся к уравнению (8) и его анализу в работе [6]. Данная зависимость установлена опытным путем и характеризует силу сопротивления для сферического шарика радиуса r и плотностью ρ , опускающегося под действием собственного веса в жидкости с плотностью ρ' . При равномерном движении шарика со скоростью u сила тяжести равна сумме сил вязкого трения и выталкивающей силы Архимеда. Из этих условий вязкость определяется выражением:

$$\eta = \frac{2(\rho - \rho')gr^2}{9u} \quad (19)$$

Скорость движения шарика определяется выражением:

$$u = \frac{2(\rho - \rho')gr^2}{9\eta} \quad (20)$$

Умножив обе части последнего выражения на 2π и преобразовав его, получим:

$$2\pi u = \frac{4\pi(\rho - \rho')gr^3}{9\eta} = \frac{F}{3\eta} \quad (21)$$

где: F – результирующая сила, равная силе вязкого трения.

Выражение (21) полностью совпадает с формулой (8), полученной экспериментальным путем,

$$6\pi\eta r = \frac{F}{\eta} \quad (22)$$

Можно заметить, что произведение $2\pi ur$ будет представлять собой пространственный объем, единичный по длине перемещения и проходимый шариком в единицу времени. Этот удельный (на единицу длины и времени) пространственный объем и есть физический смысл *проницаемости*. Сказанное можно представить в виде математической формулы так:

$$v = \Delta V_{t_1} = \frac{\Delta V}{l_1 t_1} \quad (23)$$

С учетом выражений (22) и (23) *вязкость* (динамическая) видимо должна определяться так:

$$\eta = \frac{F}{3v} \quad (24)$$

Числовой коэффициент 3 в этом выражении, по-видимому, имеет свой смысл – как связь определенно направленной силы вязкого трения со скалярной величиной вязкости.

Размерность *проницаемости* в системе СИ – $L^2 T^{-1}$. Такую же размерность имеет и *коэффициент диффузии*. Однако, эти две физические величины не одинаковы из-за разной направленности пространственной координаты, которая участвует в определении этих величин. Применительно к описанию движения тел в вязких средах, а также течения самих вязких сред, больше и вернее подходит понятие *проницаемость* в нашей трактовке.

Таким образом, по изложенному материалу можно сформулировать следующие выводы:

1. Термин *кинематическая вязкость*, обозначающий физическую величину с размерностью произведения скорости на длину, применен неудачно. Этот термин логически противоречив. Сущность

данной физической величины наиболее ясно выражает прямо противоположное понятие – *проницаемость*. Физический смысл *проницаемости* – динамически изменяющийся пространственный объем, приходящийся на единицу длины и единицу времени.

2. Представление физической величины динамическая вязкость (просто вязкость) как коэффициента, связывающего поперечный градиент скорости течения вязкой среды и плотность потока импульса, имеющего тоже поперечную направленность, логически несостоятельно. Взамен термина *плотность потока импульса* следует пользоваться понятием *давление*, размерности этих величин одинаковы.

Вязкость, именуемая *динамической*, может быть также представлена как половина произведения плотности среды на *проницаемость* и как одна треть отношения силы вязкого трения к *проницаемости*.

В заключение автор выражает благодарность доценту кафедры физики МГТУ им. Н.Э. Баумана Задорожному Н.А. за участие в обсуждении и критические замечания при подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чертов А.Г. Международная система единиц измерений.– М.: Высшая школа. 1967.– 288 с.
2. Стоцкий Л.Р. Физические величины и их единицы: Справ. кн. для учителя.– М.: Просвещение, 1984.– 239 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Т. 1. Механика. Молекулярная физика.– 3-е изд., испр.– М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.– 432 с.
4. Иродов И.Е. Физика макросис- тем. Основные законы.– 3-е изд., стереотипное.– М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.– 207 с.
5. Физические величины: Справочник /А.Б. Бабичев и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова.– М.: Энергоатомиздат, 1991.– 1232 с.
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа.– Л.1960.– 340с.
7. Физическая энциклопедия. В 5 томах. Под редакцией А.М. Прохорова.– М.: Советская энциклопедия, 1988.
8. Трофимова Т.И. Физика в таблицах и формулах: Учебн. пособие для студентов вузов.– 2-е изд., испр.– М.: Дрофа, 2004.– 432 с.
9. Чуев А.С. Система физических величин и закономерных размерностных взаимосвязей между ними. //Журнал «Законодательная и прикладная метрология».–2007.– № 3. –С 30–33.
10. <http://www.highexpert.ru> Физические свойства жидкостей. Физические свойства газов.