

Г. Миллер

Смазка авиационного двигателя

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 656
ББК 39.1
Г11

Г11 **Г. Миллер**
Смазка авиационного двигателя / Г. Миллер – М.: Книга по Требованию, 2019. – 167 с.

ISBN 978-5-458-38301-1

Смазка авиационного двигателя

ISBN 978-5-458-38301-1

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2019
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2019

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

I. ТРЕНИЕ

Трением называется взаимодействие, возникающее при движении двух тел друг относительно друга. В результате этого взаимодействия возникает реакция, называемая силой трения, препятствующая движению.

Различают трение двух родов. Трение скольжения или трение первого рода характеризуется тем, что поверхность одного тела перемещается относительно поверхности другого тела. Примером трения скольжения может служить трение тормозного башмака о поверхность тормозного барабана или трение цапфы в подшипнике.

Трение качения или трение второго рода встречается при качении тела цилиндрической формы по другому телу. Этот вид движения характеризуется тем, что точки соприкосновения двух тел в каждый данный момент неподвижны друг относительно друга. Примером трения качения может служить качение шара по плоскости или трение в шариковом или роликовом подшипнике.

Трение скольжения бывает двух родов. Если трущиеся поверхности совершенно сухие, то трение называется сухим. Если поверхности полностью отделены друг от друга слоем жидкости, например, слоем смазочного масла, то трение называется жидкостным. На практике часто встречаются промежуточные случаи. Если смазка не обеспечивает полного разделения поверхностей и поверхности частично соприкасаются, то трение называется полужидкостным. Если поверхности смазаны лишь слабо, то трение называется полусухим. К последнему виду трения относится трение твердых тел, покрытых тонкими адсорбированными пленками.

1. Сухое трение

Природа сухого трения

Причиной сухого трения является шероховатость поверхностей и молекулярное взаимодействие их.

На металлических поверхностях при микроскопическом исследовании ясно видны углубления и впадины, незаметные простым глазом. Степень шероховатости зависит от кристаллической структуры металлических поверхностей, от обработки их и твердости.

По данным проф. Берндта (Berndt) [1]¹⁾ средняя высота неровностей для мартеновской стали в зависимости от характера ее обработки имеет значения, указанные в таблице 1.

¹⁾ Цифра в квадратных скобках показывает порядковый номер литературного источника в библиографическом указателе, помещенном в конце книги.

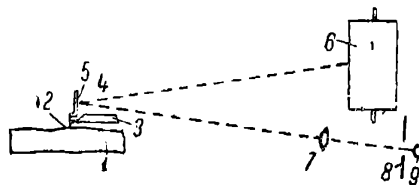
Высота неровностей, обработанных поверхностей мартеновской стали

Характер обработки поверхности	ε Высота неровностей в мм
Обточенная	0,03 ÷ 0,04
Обточенная и сглаженная полуплоским напильником . . .	0,02 ÷ 0,03
Обточенная и сглаженная личным напильником . .	0,01 ÷ 0,02
Отшлифованная наждачной шкуркой № 1	0,006 ÷ 0,007
Отшлифованная наждачным кругом	0,004 ÷ 0,005
Отшлифованная и полированная наждачной шкуркой № 00 (или закаленная и отшлифованная)	0,003 ÷ 0,004
Тщательно полированная чугуной пластинкой	0,001 ÷ 0,003
Закаленная и тщательно полированная чугуной пластинкой	около 0,0001

Чистота обработки играет важную роль в смазочной технике, поэтому в точном машиностроении в настоящее время употребляются усовершенствованные методы обработки металлических поверхностей.

Чистота отделки поверхности контролируется оптическими, электрическими и другими приборами. Е. Аббот [2] рекомендует разработанный в Мичиганском университете метод измерения при помощи специального прибора—профилографа (фиг. 1).

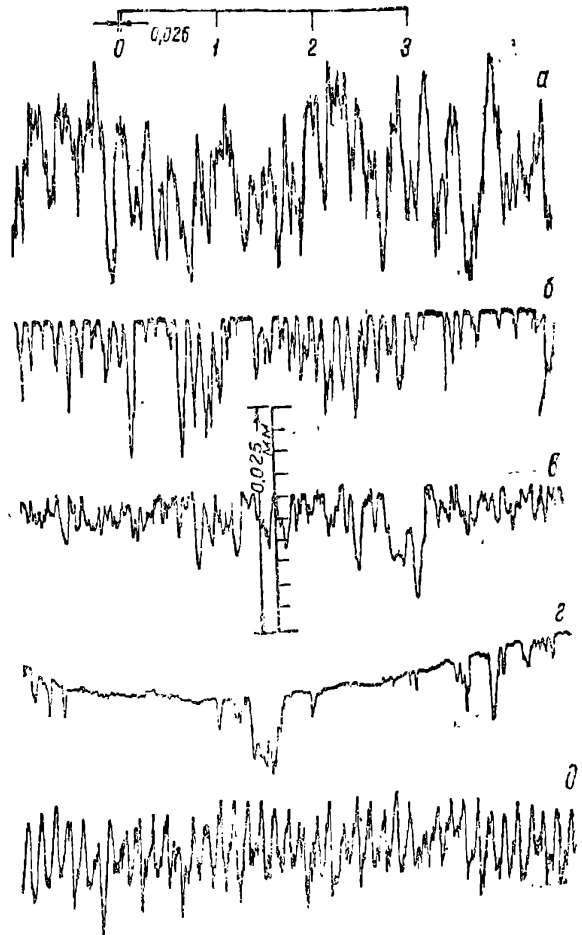
Существенную часть прибора представляет зеркальце 5, укрепленное на рычаге с миниатюрным алмазом 2, качающимся вокруг шарнира 4. Если привести алмаз в соприкосновение с шероховатой поверхностью 1 и передвигать поверхность, то алмаз, скользя по выступам и впадинам, заставит перемещаться противоположный конец рычага с зеркальцем. Перемещения зеркальца фиксируются на фотографической пластинке при помощи светового „зайчика“, отбрасываемого зеркальцем. Этот прибор измеряет шероховатость поверхностей с точностью до нескольких десятых и даже сотых долей миллиметра. Кривая профиля поверхности, снятая при помощи этого прибора, носит название профилограммы. На фиг. 2 приведены характерные профилограммы. Горизонтальный масштаб профилограмм, примерно, в 70 раз меньше вертикального масштаба, в результате чего неровности поверхности представляются в 70 раз острее, чем в действительности.



Фиг. 1. Схема профилографа.

1—образец, 2—алмазное острие, 3—опора, 4—шарнир, 5—зеркало, 6—барабан со светочувствительной бумагой, 7—линза, 8—щель, 9—лампа.

При равномерном скольжении тела B относительно другого тела A под влиянием силы T возникает сила P , относительно другого тела A под влиянием силы T возникает



Фиг. 2 Типичные профилограммы. Увеличение по вертикали в 2000 раз, по горизонтали в 30 раз.

а—обточка, б—тоже, с последующим хонингованием, в—развертка, г—изношенный цилиндр автомобильного двигателя, д—„алмазная“ расточка.

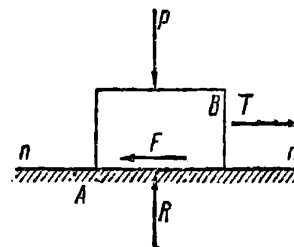
кают следующие силы: 1) нормальная реакция поверхности R и 2) касательная или тангенциальная реакция F —сила сопротивления движению, называемая силой трения.

Нормальная нагрузка P уравновешивается реакцией R опорной поверхности, сила T , вызывающая равномерное движение тела B , уравновешивается силой трения F :

$$P = R; T = F.$$

Силой трения покоя F_0 называется сила трения в момент трогания с места; под силой трения движения F понимается сила трения во время установившегося движения.

Сила трения представляет собой главным образом силу деформации и разрушения поверхностных неровностей, входящих в зацепление друг с другом под действием силы P .



Фиг. 3. К определению силы трения.

вторым сложным силой трения является сила молекулярного взаимодействия поверхностей.

Законы сухого трения

Наблюдения и опыты над сопротивлением сухого трения ведутся со времени Леонардо да Винчи (Leonardo da Vinci). Амонтон (1699 г.) и Кулон (Coulomb) (1779 г.) пришли к выводу, что сила трения пропорциональна силе, с которой поверхности прижимаются друг к другу. Этот основной закон, носящий название закона Кулона, развит другими исследователями: Мореном (1831 г.), Ренни, Пуаре и Боше, а затем Гальтоном и Вестингаузом и др.

Законы сухого трения, на основании вышеуказанных исследований, можно формулировать следующим образом:

I. Сила трения пропорциональна нагрузке.

$$F = fP, \quad (1)$$

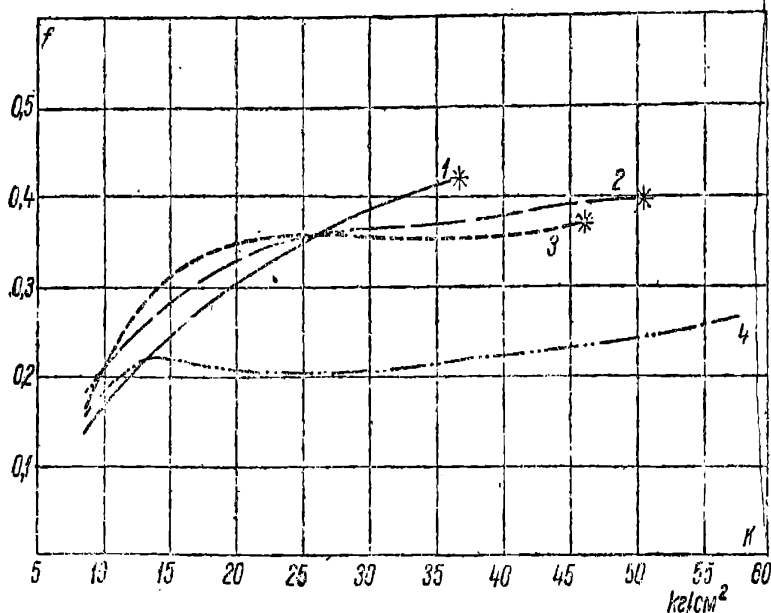
f — безразмерный коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом трения.

Коэффициент трения, равный

$$f = \frac{F}{P}, \quad (2)$$

можно определить опытным путем.

II. Сила трения не зависит от площади скользящих поверхностей. Например, для передвижения стального бруска весом 10 кг с площадью скольжения 10 см² по чугунной плите требуется сила 2 кг.



Фиг. 4. Зависимость коэффициента трения f от давления по опытам Рени.

1—сварочное железо по сварочному железу, 2—чугун по сварочному железу, 3—сталь по чугуну, 4—бронза по стали, *—момент заедания поверхностей.

Если этот брусок перевернуть на другую сторону, имеющую площадь 20 см², то и в этом случае сила трения будет 2 кг.

Сравнивая этот закон с законом 1, приходим к заключению, что сила трения не зависит от удельного давления между трущимися поверхностями. Однако, это правило верно лишь для малых удельных давлений. При возрастании удельного давления эта зависимость нарушается.

Изменение силы трения в широком диапазоне изображено на фиг. 4.

Возрастание силы трения с повышением удельного давления для металлов объясняется увеличением числа поверхностных неровностей, входящих в зацепление друг с другом, и изменением характера деформации неровностей, приближающегося к явлениям сминания и резания.

III. Сила трения покоя больше силы трения движения. Эта закономерность для металлов подтверждается таблицей 2.

Т а б л и ц а 2

Коэффициент трения покоя f_0 и коэффициент трения движения f

М а т е р и а л ы	f_0	f
Сталь по чугуну .	0,33	0,13
Сталь по стали . . .	0,15	0,09
Сталь по фосфористой бронзе		
а) плоские поверхности . .	0,11	0,105
б) цилиндрич. поверхности .	0,169	0,162
Железо по бронзе	0,19	0,18
Железо по чугуну	0,19	0,18

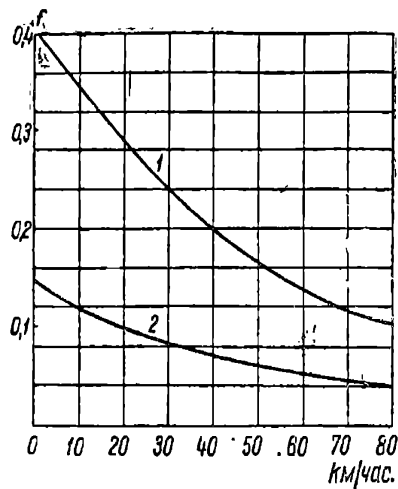
IV. Сила трения уменьшается с увеличением скорости скольжения. Этот закон иллюстрируется результатами опытов Гальтона и

Т а б л и ц а 3

Коэффициент трения f между металлическими поверхностями

	Латунь	Сталь	Чугун	Железо	Олово
Латунь	0,175	0,139	0,141	0,135	—
Сталь	0,139	0,146	0,151	0,181	—
Чугун	0,141	0,151	0,163	0,170	0,179
Железо	0,135	0,181	0,170	0,160	0,181
Олово	—	—	0,179	0,181	0,265

Вестингауза (фиг. 5), определявших коэффициент трения между чугунными тормозными колодками и стальными бандажами вагонных колес, а также между стальными бандажами и стальным рельсом при различных скоростях движения.



Фиг. 5. Коэффициент трения в функции скорости движения.

1—между колодкой тормоза и колесом, 2—между бандажем и рельсом.

V. Сила трения зависит от свойств материалов скользящих поверхностей. В качестве примера можно привести опыты Ренни [5] (таблица 3).

VI. Сила трения зависит от состояния скользящих поверхностей. При скольжении шероховатых поверхностей коэффициент трения больше, чем у гладких. Так, для нешлифованных металлических поверхностей коэффициент трения $f=0,22 \div 0,23$, для тех же поверхностей, но шлифованных $f=0,18 \div 0,19$.

При скольжении поверхностей наблюдается повышение их температуры. Энергия, которая затрачивается на преодоление силы трения и на поддержание равномерного движения превращается в тепло и повышает температуру трущихся тел. Это явление было изучено еще Джоулем, воспользовавшимся им для доказательства эквивалентности тепла и работы.

Задача 1. Найти силу F_0 , необходимую для того, чтобы сдвинуть с места, и силу F , необходимую для того, чтобы перемещать чугунный брусок размером $458 \text{ мм} \times 65 \text{ мм}$, весом 235 кг по стальной гладкой горизонтальной поверхности без смазки с равномерной скоростью $v_1=13,9 \text{ м/сек}$. Какое количество тепла выделится в час при равномерном движении бруска.

Решение. Определим удельное давление

$$p = \frac{P}{S} = \frac{235}{45,8 \cdot 6,5} = 0,79 \text{ кг/см}^2.$$

Из диаграммы фиг. 5 по кривой 1 получаем

$$f_0 = 0,42,$$

следовательно

$$F_0 = f_0 P = 0,42 \cdot 235 = 98,7 \text{ кг}.$$

Для скорости $v_1 = 13,9 \cdot 3,6 = 50 \text{ км/час}$ по кривой 1 находим $f = 0,166$,

следовательно

$$F = fP = 0,166 \cdot 235 = 39 \text{ кг}.$$

Секундное количество тепла, выделяющегося при скольжении, равно:

$$Q_s = \frac{f P v_1}{427} = \frac{0,166 \cdot 235 \cdot 13,9}{427} = 1,27 \text{ Кал/сек}.$$

Часовое количество тепла:

$$Q_h = Q_s \cdot 3600 = 1,27 \cdot 3600 = 4572 \text{ Кал/час}.$$

2. Жидкостное трение

Природа жидкостного трения

При относительном скольжении поверхностей, разделенных слоем смазывающей жидкости возникает жидкостное трение, обусловленное внутреннему трению частиц жидкости и внешнему трению жидкости о твердые поверхности.

С точки зрения молекулярной физики внутреннее трение жидкости объясняется тем, что к беспорядочному тепловому движению молекул присоединяется движение их в направлении скольжения. При этом молекулы жидкости оказывают сопротивление перемещению по отношению друг к другу. В результате возникает сопротивление смазочного материала сдвигу, т. е. сила трения.

Внешнее трение является результатом трения поверхностей о жидкость при скольжении. В большинстве случаев смазывающие жидкости настолько хорошо прилипают к металлическим поверхностям, что первый, смачивающий твердую поверхность слой жидкости, неподвижен относительно этой поверхности и внешнее трение практически отсутствует.

Закон жидкостного трения

Ньютон (Newton) (1643—1727) теоретическим и экспериментальным путем вывел следующую зависимость между силой трения F' , поверхностью трущихся тел S , скоростью скольжения v и толщиной слоя h жидкости (фиг. 6).

$$F' = \mu S \frac{dv}{dh}, \quad (3)$$

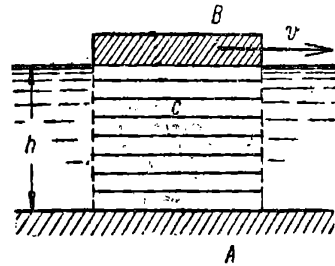
где μ — коэффициент вязкости смазывающей жидкости и $\frac{dv}{dh}$ — градиент скорости поперек слоя жидкости.

Если

$$\frac{dv}{dh} = \text{const} = \frac{v}{h},$$

то

$$F = \mu S \frac{v}{h}. \quad (4)$$



Фиг. 6. Схема жидкостного трения.

Проф. Петров [3] в 1889 г. вывел выражение силы жидкостного трения в общем виде:

$$F' = \mu \frac{Sv}{h + \frac{\mu}{\lambda_1} + \frac{\mu}{\lambda_2}}, \quad (5)$$

где λ_1 и λ_2 — коэффициенты внешнего трения жидкости о поверхности A и B.

На практике λ_1 и λ_2 весьма велики, сумма

$$\frac{\mu}{\lambda_1} + \frac{\mu}{\lambda_2}$$

в знаменателе формулы (5) очень мала по сравнению с h , поэтому ею можно пренебречь, и уравнение (5) в таком случае совпадает с законом Ньютона:

$$F' = \mu \frac{Sv}{h}.$$

Из этого уравнения можно сформулировать основной закон жидкостного трения следующим образом.

Сила жидкостного трения пропорциональна коэффициенту вязкости жидкости, величине поверхности скользящего тела, относительной скорости скользящего тела и обратно пропорциональна толщине слоя смазывающей жидкости.

Работа трения в единицу времени равна произведению силы жидкостного трения F' на относительную скорость скольжения v .

$$W_s = F'v \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}} \right]$$

или после подстановки

$$W_s = \frac{\mu S v^2}{h} \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}} \right].$$

Количество тепла, выделившегося в результате трения, эквивалентно работе трения:

$$Q_s = \frac{\mu S v^2}{h \cdot 427} \left[\frac{\text{Кал}}{\text{сек}} \right]. \quad (6)$$

Вязкость

Если величины S , v и h в уравнении (4) приравнять единице, то

$$F' = \mu,$$

т. е. вязкость может быть измерена силой на единицу площади слоя жидкости, потребной для перемещения этого слоя относительно дру-

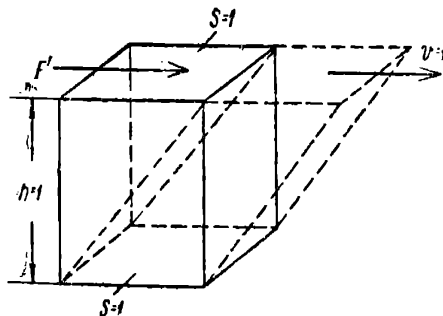
гого слоя, отстоящего на расстоянии единицы со скоростью, равной единице (фиг. 7).

Вязкость, определенная подобным образом, носит название абсолютной вязкости.

а) Абсолютная вязкость.

Абсолютная вязкость может быть выражена в системе единиц сантиметр—грамм (масса)—секунда [CGS] („абсолютная“ или физическая система)

и в системе метр—килограмм (сила)—секунда [MKS] (техническая система).



Фиг. 7. К определению вязкости.

По определению вязкости размерность ее следующая:

$$[\mu] = \left[\frac{F' \cdot h}{S \cdot v} \right] = \left[\frac{m \cdot g \cdot h}{S v} \right] = \left[\frac{MLLT}{T^2 L^2 L} \right] = [L^{-1} M T^{-1}] = [L^{-2} P T], \quad (7)$$

где m — масса,

g — ускорение силы тяжести,

L — единица длины,

M — единица массы,

T — единица времени,

P — единица силы.

Размерность абсолютной вязкости в физической системе [CGS]:

$$[\mu_\phi] = \left[\frac{g \text{ (масса)}}{cm \cdot сек} \right] = \left[\frac{дина \cdot сек}{cm^2} \right]^1).$$

Единица абсолютной вязкости, выраженная в системе [CGS] называется — *пуазом*. Величина в 100 раз меньшая носит название *сантипуаза*.

$$1 \text{ сантипуаз} = 0,01 \text{ пуаза.}$$

Размерность абсолютной вязкости в технических единицах будет:

$$[\mu_m] = \left[\frac{F' \cdot h}{S \cdot v} \right] = \left[\frac{кг \cdot м}{\frac{м^2}{сек}} \right] = \left[\frac{кг \cdot сек}{м^2} \right].$$

Единицей абсолютной вязкости в технической системе единиц называется сила в кг, которая требуется для перемещения слоя жидкости площадью в 1 м², находящегося на расстоянии 1 м от другого слоя, со скоростью 1 м/сек.

Между абсолютной вязкостью в системе [CGS] и [MKS] существует соотношение, которое получится, если килограммы веса перевести в дины (1 кг = 981000 дин), а квадратные метры в квадратные сантиметры (1 м² = 10000 см²)

$$\mu_\phi = \left[\frac{дина \cdot сек}{cm^2} \right] = \mu_m \left[\frac{кг \cdot сек}{м^2} \right] \frac{981000}{10000} = 98,1 \mu_m$$

или

$$\mu_m = \frac{1}{98,1} \mu_\phi,$$

$$\mu_m = 0,0102 \mu_\phi. \quad (8)$$

б) *Кинематическая вязкость*. Отношение абсолютной вязкости μ к плотности жидкости ρ называется (по Максвеллу) кинематической вязкостью и обозначается через ν :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (9)$$

¹⁾ Напомним, что 1 г (масса) = $\frac{1 \text{ дина}}{981 \text{ см/сек}^2}$.

Заменяя в уравнении (9) плотность ¹⁾ через удельный вес,

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (10)$$

получаем:

$$\nu = \frac{\mu \cdot g}{\gamma},$$

где γ — удельный вес жидкости в $\left[\frac{m}{m^3} \right]$, $\left[\frac{кг}{л} \right]$ или $\left[\frac{г}{см^3} \right]$,

g — ускорение силы тяжести = $981 \frac{см}{сек^2}$ или $9,81 \frac{м}{сек^2}$.

Из определения кинематической вязкости находим ее размерность в общем виде:

$$[\nu] = \left[\frac{\mu}{\rho} \right] = \left[\frac{ML^3}{LTM} \right] = [L^2T^{-1}]. \quad (12)$$

Размерность кинематической вязкости в системе [CGS] равна:

$$[\nu_{\phi}] = \left[\frac{см^2}{сек} \right],$$

в системе [MKS]:

$$[\nu_m] = \left[\frac{м^2}{сек} \right].$$

Между кинематической вязкостью в системе [CGS] и [MKS] существует соотношение, которое получается, если квадратные метры перевести в квадратные сантиметры ($1 м^2 = 10000 см^2$):

$$\nu_{\phi} \left[\frac{см^2}{сек} \right] = \nu_m \left[\frac{м^2}{сек} \right] \cdot 10000$$

или

$$\nu_m = 0,0001 \nu_{\phi}. \quad (13)$$

в) *Условные единицы вязкости.* Вязкость часто выражают в условных единицах, определяемых при помощи приборов, называемых вискозиметрами.

Чаще всего вязкость определяется по скорости истечения жидкости из капилляра. Этот способ определения вязкости предложен Пуазейлем.

В СССР применяются вискозиметры Энглера и Оствальда. В приборе Энглера вязкость измеряется в *градусах Энглера*, которые представляют собой *частное от деления времени истечения через капилляр прибора 200 см³ испытуемой жидкости ко времени истечения через этот же капилляр того же количества воды при 20° С.*

¹⁾ Плотность масла зависит от температуры. По Менделееву плотность масла при произвольной температуре t равна:

$$\rho_t = \frac{\rho_{15}}{1 + 0,00064(t - 15)}, \quad (11)$$

где ρ_{15} — плотность при $t = 15^\circ \text{C}$.