

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М. Ф. Решетнева

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА**

*Методические указания к выполнению лабораторной работы  
для студентов бакалавриата технических направлений подготовки  
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»,  
24.03.01 «Ракетные комплексы и космонавтика» всех форм обучения*

Красноярск 2017

УДК 539.194

Рецензент

кандидат педагогических наук, доцент П. П. МАШКОВ  
(Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М. Ф. Решетнева)

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
университета

**Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса :**  
метод. указания к выполнению лабораторной работы для студентов бакалавриата технических направлений подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 24.03.01 «Ракетные комплексы и космонавтика» всех форм обучения / сост.: А. М. Харьков, М. Н. Ситников ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2017. – 20 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие сведения .....	4
Лабораторная работа 8 «Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса» .....	5
Краткие теоретические сведения.....	5
Формула Стокса .....	8
Число Рейнольдса .....	8
Движение тел в жидкостях .....	10
Метод определения коэффициента вязкости $\eta$ .....	13
Порядок выполнения работы.....	15
Задание к работе .....	15
Контрольные вопросы и задания для самоподготовки .....	15
Библиографический список.....	17
Приложение .....	18

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Лабораторная работа «Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса» входит в цикл работ по механике, молекулярной физике и термодинамике, которые проводятся в лаборатории «механики, молекулярной физики и термодинамики» СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Из пятнадцати работ цикла ей присвоен порядковый номер 8.

В данных методических указаниях приведены теоретические сведения, описание экспериментальной установки и порядок проведения лабораторной работы. В конце методических указаний даны контрольные вопросы, что позволит оценивать знания индивидуально у каждого студента, а также приведен библиографический список рекомендованной литературы, необходимый для подготовки, проведения и защиты лабораторной работы.

Методические указания к лабораторной работе по разделу физики «Молекулярная физика и термодинамика» по содержанию и объему отвечают требованиям учебного плана подготовки студентов технических специальностей и охватывают темы: течения жидкости, метод и закон Стокса, уравнение Ньютона, уравнение Бернулли, число Рейнольдса. Методические указания сопровождаются иллюстративным материалом, который позволяет лучше понять физическую сущность изучаемых явлений.

В помощь студентам, выполняющим лабораторную работу, разработан бланк отчета (см. приложение), содержащий таблицы для внесения экспериментальных данных и результатов расчетов. Отчет должен быть оформлен и обязателен при защите лабораторной работы. На выполнение лабораторной работы отводится два учебных часа.

*Лабораторная работа 8*  
**Определение коэффициента вязкости жидкости**  
**методом Стокса**  
(2 часа)

*Цель работы:* экспериментальное определение коэффициентов вязкости жидкости для масла и для глицерина.

*Задачи работы:*

1. Изучить метод Стокса по определению коэффициента вязкости жидкости.

2. Освоить методику расчетов данного метода.

*Обеспечивающие средства:* лабораторная установка (прибор Стокса), методика проведения эксперимента; стальные шарики, секундомер, масштабная линейка, магнит, микрометр.

*Задание:* осуществить эксперимент по методу Стокса, определить коэффициенты вязкости, сделать вывод.

### **Краткие теоретические сведения**

Раздел физики, в котором рассматривают законы равновесия и движения жидких и газообразных тел, а также их взаимодействие с твердыми телами, называют гидроаэромеханикой.

Характерное свойство жидких и газообразных тел – их текучесть, т. е. малая сопротивляемость деформации сдвига: если скорость сдвига стремится к нулю, то силы сопротивления жидкости или газа этой деформации сдвига также стремятся к нулю. Иными словами, жидкие и газообразные тела не обладают упругостью формы – они легко принимают форму того сосуда, в котором находятся. Вследствие этого внешнее давление, производимое на жидкость или газ, передается ими во все стороны равномерно (закон Паскаля).

Движение жидкостей или газов называют течением, а совокупность частиц движущейся жидкости или газа называют потоком. В гидроаэромеханике отвлекаются от молекулярного строения жидкостей или газов, рассматривая их как сплошную среду, непрерывно распределенную в занятой ею части пространства. При этом различие между жидкостью и газом состоит лишь в том, что плотность  $\rho$  первой можно считать не зависящей от давления, в то время как зависимостью плотности газа от давления, т. е. сжимаемостью газа, при больших скоростях течения пренебрегать нельзя. В дальнейшем, ради

краткости, мы будем называть газ и жидкость единым термином – жидкость, которую в зависимости от условий задачи будем считать несжимаемой ( $\rho = \text{const}$ ) или сжимаемой ( $\rho \neq \text{const}$ ).

Течение жидкости называют установившимся, или стационарным, если скорость жидкости в каждой точке пространства, занятого жидкостью, не изменяется с течением времени, т. е. скорость  $v$  не зависит от  $t$ . В случае неустановившегося течения  $v$  зависит от времени.

Течение называют ламинарным, или слоистым, в том случае, если поток представляет собой совокупность слоев, перемещающихся друг относительно друга без перемешивания. Течение называют турбулентным, если имеет место перемешивание различных слоев жидкости или газа вследствие образующихся завихрений.

В целях наглядности движение жидкости можно изображать с помощью линий тока, которые проводят так, что касательные к ним совпадают по направлению с векторами скорости жидкости в соответствующих точках пространства.

Поверхность, которая образована линиями тока, проведенными через все точки малого замкнутого контура, называют трубкой тока. Часть жидкости, ограниченную трубкой тока, называют струей.

В реальных жидкостях течение усложняется тем, что между отдельными слоями потока происходит внутреннее трение. Однако в ряде случаев влияние внутреннего трения невелико и им можно пренебречь. Жидкость, в которой отсутствует внутреннее трение, называют идеальной жидкостью.

*Вязким трением* называется сила трения, возникающая между слоями жидкости или газа, перемещающимися параллельно друг другу с различными по модулю скоростями. Со стороны слоя, движущегося быстрее, на более медленно, на 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  $v$  и хаотического теплового движения молекул. Рассмотрим два слоя  $A$  и  $B$  жидкости, движущихся параллельно друг другу со скоростями  $v_1$  и  $v_2$  (рис. 1).

Благодаря тепловому движению молекулы из слоя  $B$  переходят в слой  $A$  и «переносят» в этот слой импульсы  $m_0 v_2$  своего упорядоченного движения. Если  $v_1 > v_2$ , то такие молекулы при столкновениях

с частицами слоя  $A$  ускоряют свое упорядоченное движение, а молекулы слоя  $A$  – замедляют. При переходе молекул из быстрее движущегося слоя  $A$  в слой  $B$  они переносят большие импульсы  $m_0 v_1$ , и соударения между молекулами приводят к ускорению упорядоченного движения молекул слоя  $B$ . В результате этих процессов переноса импульсов молекул между слоями  $A$  и  $B$  возникают силы трения, направленные, как уже сказано выше, по касательной к поверхности соприкосновения слоев. Для силы внутреннего трения справедливо уравнение Ньютона:

$$F_{\text{тр}} = \eta \cdot \frac{dv}{dx} \cdot S, \quad (1)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость – это свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой;  $dv/dx$  – градиент скорости, показывающий быстроту изменения скорости в направлении  $x$ , перпендикулярном направлению движения слоев жидкости или газа;  $S$  – площадь поверхности слоя.

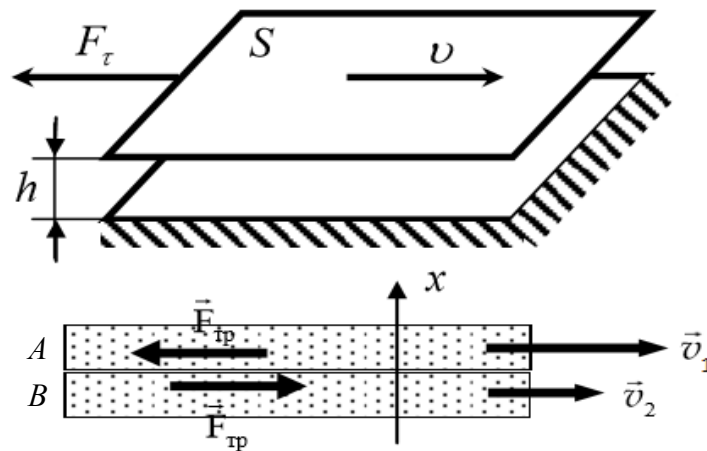


Рис. 1. Два слоя жидкости, движущиеся параллельно друг другу со скоростями  $v_1$  и  $v_2$

Вследствие хаотического теплового движения молекул происходит обмен молекулами между слоями жидкости или газа, движущимися с различными скоростями, в результате чего импульс слоя, движущегося быстрее, уменьшается, а движущегося медленнее – увеличивается (происходит перенос импульса от одного слоя к другому). Это приводит к торможению слоя, движущегося быстрее, и ускорению слоя, движущегося медленнее. Поэтому уравнение Ньютона полностью описывает внутреннее трение (вязкость).

## Формула Стокса

При малых числах Рейнольдса, т. е. при небольших скоростях движения и небольших  $l$ , сопротивление среды обусловлено практически только силами трения. Стокс установил, что сила сопротивления в этом случае пропорциональна коэффициенту динамической вязкости  $\eta$ , скорости  $v$  движения тела относительно жидкости и характерному размеру тела  $l$ :

$$F \sim \eta \cdot l \cdot v \quad (2)$$

(предполагается, что расстояние от тела до границ жидкости, например до стенок сосуда, значительно больше размеров тела). Коэффициент пропорциональности зависит от формы тела. Для шара, если в качестве  $l$  взять радиус шара  $r$ , коэффициент пропорциональности оказывается равным  $6\pi$ . Следовательно, сила сопротивления движению шарика в жидкостях при небольших скоростях в соответствии с формулой Стокса равна

$$F = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v. \quad (3)$$

Коэффициент вязкости  $\eta$  среды зависит от ее температуры. Интересно отметить, что у газов он при нагревании возрастает, а у жидкостей уменьшается. Это указывает на то, что природа внутреннего трения в газах и жидкостях различна. Например: вязкость касторового масла при увеличении температуры от 18 до 40 °С падает почти в 4 раза.

В табл. 1 приведены значения коэффициента вязкости  $\eta$  для некоторых жидкостей.

Таблица 1

Жидкость	Коэффициент вязкости (Па·с)		
	$t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 99\text{ }^{\circ}\text{C}$
Вода	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$0,29 \cdot 10^{-3}$
Ртуть	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Эфир	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$	—
Глицерин	4,6	1,5	—

## Число Рейнольдса

Английский ученый Рейнольдс установил, что характер течения зависит от безразмерной величины:



$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\eta}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости (или газа);  $v$  – средняя (по сечению трубы) скорость потока;  $\eta$  – динамический коэффициент вязкости жидкости;  $l$  – характерный для поперечного сечения размер, например, сторона квадрата при квадратном сечении, радиус или диаметр при круглом сечении и т. д.

Величина, выведенная в формуле (4), называется числом Рейнольдса. При малых значениях числа Рейнольдса наблюдается ламинарное течение. Начиная с некоторого определенного значения  $Re$ , называемого критическим, течение приобретает турбулентный характер. Если в качестве характерного размера для круглой трубы взять ее радиус  $r$ , то критическое значение числа Рейнольдса оказывается равным примерно 1000. В число Рейнольдса входят в виде отношения две величины, зависящие от свойств жидкости, – плотность  $\rho$  и динамический коэффициент вязкости  $\eta$ .

Отношение

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

называется кинематической вязкостью. Используя кинематическую вязкость, числу Рейнольдса можно придать следующий вид:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu}. \quad (6)$$

Число Рейнольдса служит критерием подобия для течения жидкостей в трубах, каналах и т. д. Характер течения различных жидкостей (или газов) в трубах различных сечений будет совершенно одинаков, если каждому течению соответствует одно и то же значение  $Re$ .

Текущую жидкость можно рассматривать как невязкую, если число Рейнольдса для такого течения  $Re > 1$ . Дадим некоторые оценки течения жидкости по круглой трубе радиуса  $R$ . Число Рейнольдса в этом случае будет составлять

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot R}{\eta}. \quad (7)$$

Если принять радиус трубы  $R = 1$  см и скорость течения  $v = 1$  см/с, то для воды ( $\rho = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\eta = 1,15 \cdot 10^{-3}$  Па·с при  $t = 15$  °C) число  $Re = 86$ . Это означает, что силы вязкости не существенны, и воду

можно рассматривать как невязкую жидкость. Однако это приближение становится несправедливым, если радиус трубки уменьшить на два порядка, и  $Re = 0,86 < 1$ . При таком течении распределение давлений и скоростей в потоке уже не подчиняется уравнению Бернулли:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho g v + p = \text{const.} \quad (8)$$

Еще в большей степени это относится к вязкому глицерину ( $\eta = 1,4 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ). При течении воздуха по трубе ( $\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ) число Рейнольдса приблизительно на порядок меньше его значения для воды. Это указывает на то, что силы вязкости при течении воздуха и других газов играют большую роль, чем при течении воды.

### Движение тел в жидкостях

При движении тела в жидкостях (рис. 2) на него действуют силы, равнодействующую которых мы обозначим буквой  $R$  (рис. 2, *a*).

Силу  $R$  можно разложить на две составляющие, одна из которых  $Q$  направлена в сторону, противоположную движению тела (или в сторону движения потока, набегающего на тело), а вторая  $P$  перпендикулярна к этому направлению. Составляющие  $Q$  и  $P$  называются, соответственно, лобовым сопротивлением и подъемной силой.

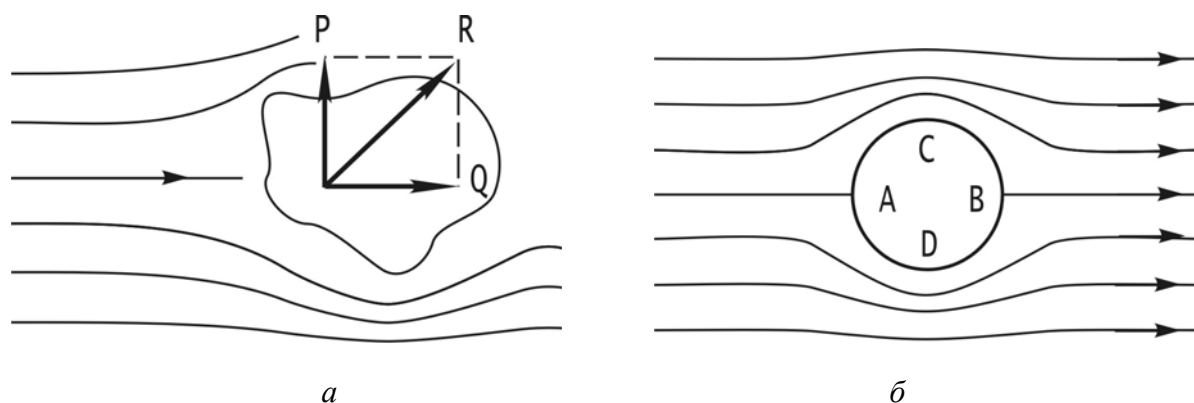


Рис. 2. Тело в жидкости:

*a* – расстановка сил при движении тела в жидкостях; *б* – линии тока при обтекании очень длинного «бесконечного» цилиндра идеальной жидкостью

Очевидно, что на тело, симметричное относительно направления движения, может действовать только лобовое сопротивление, подъемная же сила в этом случае будет равна нулю.

Как показывают расчеты, в идеальной жидкости равномерное движение тел должно было бы происходить без лобового сопротивления. Не обладая вязкостью, идеальная жидкость должна свободно скользить по поверхности тела, полностью обтекая его (рис. 2, б). Вследствие полного обтекания картина линий тока оказывается совершенно симметричной как относительно прямой, проходящей через точки  $A$  и  $B$ , так и относительно прямой, проходящей через точки  $C$  и  $D$ . Поэтому давление вблизи точек  $A$  и  $B$  будет одинаково (и больше, чем в невозмущенном потоке, так как скорость вблизи этих точек меньше); точно так же давление вблизи точек  $C$  и  $D$  тоже будет одинаково (и меньше, чем в невозмущенном потоке, так и скорость вблизи этих точек больше). Следовательно, результирующая сил давления на поверхность цилиндра (которая при отсутствии вязкости могла бы обусловить лобовое сопротивление), очевидно, будет равна нулю. Такой же результат получается и для тел другой формы.

Вследствие полного обтекания линии тока будут симметричны относительно прямой  $CD$  цилиндра идеальной жидкостью (рис. 3). Однако относительно прямой  $AB$  картина будет несимметричной. Линии тока сгущаются вблизи точки  $C$ , поэтому давление здесь будет меньше, чем вблизи точки  $D$ , и возникает подъемная сила  $P$  (рис. 3, а). Аналогичным образом возникает подъемная сила в вязкой жидкости.

Силой, поддерживающей самолет в воздухе, служит подъемная сила, действующая на крылья. Лобовое сопротивление играет при полете самолета вредную роль. Поэтому крыльям самолета и его фюзеляжу придают хорошо обтекаемую форму. Профиль крыла должен вместе с тем обеспечивать достаточную по величине подъемную силу. Оптимальный для крыла профиль найден великим русским ученым Н. Е. Жуковским (рис. 3, б).

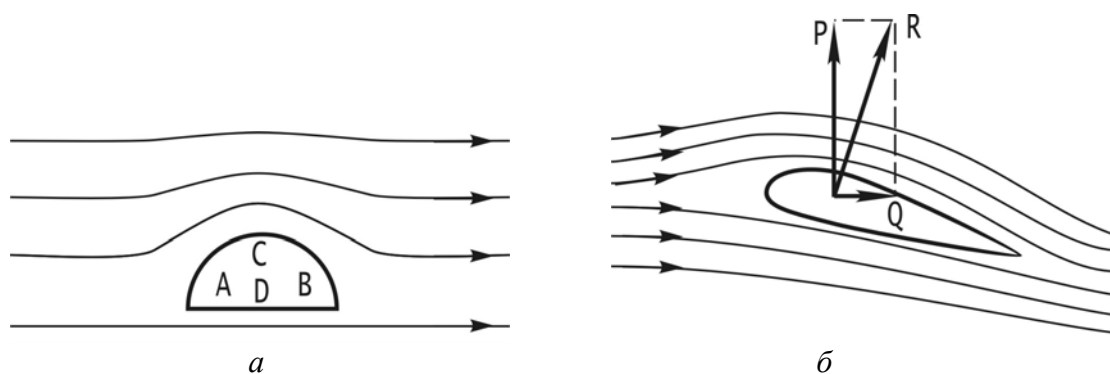


Рис. 3. Подъемная сила:

а – линии тока при обтекании идеальной жидкостью полуцилиндра;  
б – подъемная сила крыла

Иначе протекают явления при движении тела в жидкости, обладающей вязкостью. В этом случае очень тонкий слой жидкости прилипает к поверхности тела и движется с ним как одно целое, увлекая за собой из-за трения последующие слои. По мере удаления от поверхности тела скорость слоев становится все меньше и, наконец, на некотором расстоянии от поверхности жидкость оказывается практически невозмущенной движением тела. Таким образом, тело оказывается окруженным слоем жидкости, в котором имеется градиент скорости. Этот слой называется пограничным. В нем действуют силы трения, которые в конечном итоге оказываются приложенными к телу и приводят к возникновению лобового сопротивления (рис. 4). Но дело не исчерпывается только этим. Наличие пограничного слоя в корне изменяет характер обтекания тела жидкостью. Полное обтекание становится невозможным. Действие сил трения в поверхностном слое приводит к тому, что поток отрывается от поверхности тела, в результате чего позади тела возникают вихри (рис. 4, а).

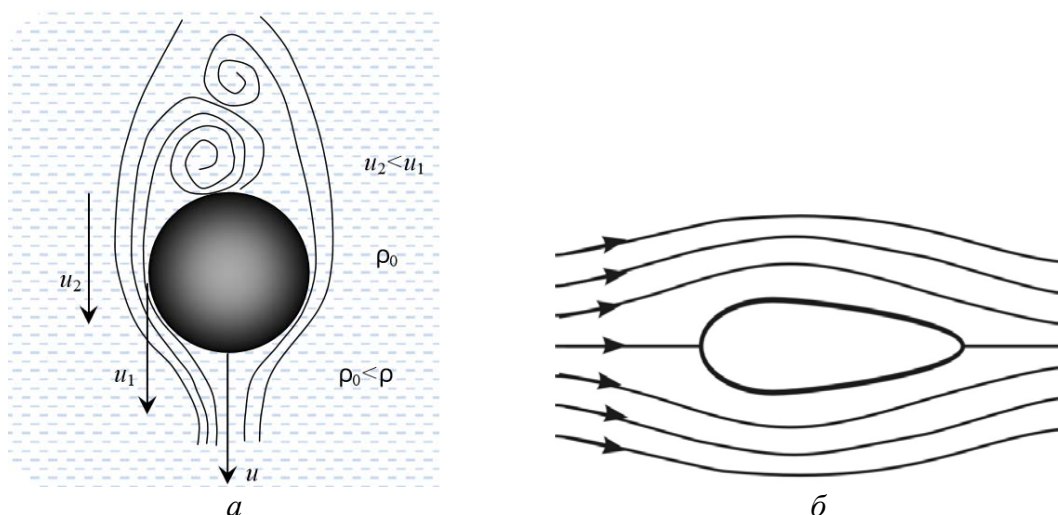


Рис. 4. Вихри в вязкой среде:  
а – образование вихрей при движении тела  
в вязкой среде; б – каплевидная форма тел

Вихри уносятся потоком и постепенно затухают вследствие трения; при этом энергия вихрей расходуется на нагревание жидкости. Давление в образующейся за телом вихревой области оказывается пониженным, поэтому результирующая сил давления будет отлична от нуля, в свою очередь обуславливая лобовое сопротивление. Давление в стационарном потоке жидкости меняется в зависимости от скорости потока так, что в области вихрей оно существенно уменьшается (уравнение Бернулли:  $p_1 + \rho_0 u_1^2 / 2 = p_2 + \rho_0 u_2^2 / 2$ ).

Разность давлений:  $\Delta p = p_0 (u_1^2 - u_2^2)/2$  в областях перед телом и за ним создает силу «лобового» сопротивления ( $F = \Delta p \cdot S$ ) и тормозит движение тела.

Таким образом, лобовое сопротивление складывается из сопротивления трения и сопротивления давления. При данных поперечных размерах тела сопротивление давления сильно зависит от формы тела. По этой причине его называют также сопротивлением формы. Наименьшим сопротивлением давления обладают тела хорошо обтекаемой каплевидной формы (рис. 4, б). Такую форму стремятся придать фюзеляжу и крыльям самолетов, кузову автомобилей и т. п.

Соотношение между сопротивлением трения и сопротивлением давления определяется числом Рейнольдса (см. формулу (4)).

При малых  $Re$  основную роль играет сопротивление трения, так что сопротивление давления можно не принимать во внимание. При увеличении  $Re$  роль сопротивления давления все больше растет. При больших значениях  $Re$  в лобовом сопротивлении преобладают силы давления.

Определяя характер сил, действующих на тело в потоке, число Рейнольдса может служить критерием подобия явлений и в этом случае. Это обстоятельство используется при моделировании. Например, модель самолета будет вести себя в потоке газа таким же образом, как и ее прообраз, если, кроме геометрического подобия модели и самолета, будет соблюдено также равенство для них чисел Рейнольдса.

### Метод определения коэффициента вязкости $\eta$

На маленький шарик, свободно падающий в вязкой жидкости, действуют три силы (рис. 5):

а) сила тяжести

$$F_T = m \cdot g = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g, \quad (9)$$

где  $r$  – радиус шарика;  $\rho$  – его плотность;

б) выталкивающая сила (сила Архимеда)

$$F_A = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \delta \cdot g, \quad (10)$$

где  $\delta$  – плотность жидкости;

в) сила сопротивления, согласно закону Стокса, равная

$$F_{\text{сопр}} = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v, \quad (11)$$

где  $v$  – скорость слоя жидкости, прилипшего к шарiku радиусом  $r$ .

Равнодействующая всех сил, действующих на шарик, равна

$$F_{\text{рав}} = F_T - (F_{\text{сопр}} + F_A). \quad (12)$$

Если при установившемся движении (равномерном)  $F = 0$ , то

$$F_T - F_A = F_{\text{сопр}}. \quad (13)$$

Подставляя в формулу (13) соответствующие значения  $F_T$ ,  $F_{\text{сопр}}$ ,  $F_A$ , получим

$$\eta = \frac{2}{9}(\rho - \delta) \frac{g \cdot r^2}{v}. \quad (14)$$

Заметим, что  $r^2 = d^2 / 4$ , где  $d$  – диаметр шарика и  $v = l/t$ ,  $l$  – путь равномерного (установившегося) движения шарика. Подставив значения  $v$  и  $r^2$  в формулу (14), получим рабочую формулу

$$\eta = \frac{(\rho - \delta)g \cdot d^2 \cdot t}{18 \cdot l}. \quad (15)$$

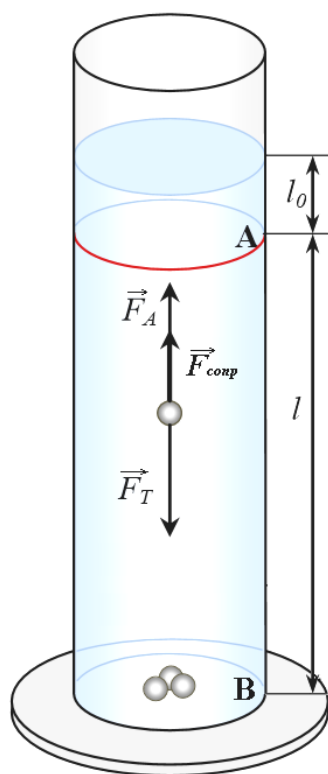


Рис. 5. Падающий шарик в сосуде с вязкой жидкостью

Можно отдельно посчитать величину

$$A = \frac{(\rho - \delta) \cdot g}{18 \cdot l}, \quad (16)$$

тогда формула (15) упростится:

$$\eta = A \cdot d^2 \cdot t. \quad (17)$$

Формула (17) справедлива для безграничной среды. На движение шарика в жидкости, находящейся в каком-либо сосуде, будут влиять стенки этого сосуда. Если шарик падает вдоль оси цилиндрического сосуда радиусом  $R$ , то учет влияния стенок приводит к следующему выражению для коэффициента вязкости:

$$\eta = \frac{1}{18}(\rho - \delta) \frac{g \cdot d^2 \cdot t}{l \cdot \left(1 + 2,4 \frac{r}{R}\right)}. \quad (18)$$

Метод Стокса основан на измерении скорости медленно движущихся в жидкости небольших тел сферической формы.

## Порядок выполнения работы

1. Измерить микрометром диаметры шариков.
2. Записать в табл. 2 значения диаметров, а также плотности жидкостей  $\delta_1$  и  $\delta_2$  и плотность материала шарика  $\rho$  (сталь).
3. Опуская шарик в жидкость так, чтобы он падал по центру сосуда, измерить длину его пути  $l$  и время падения  $t$ . Начало отсчета по шкале необходимо брать на  $l_0 = 10; 15$  см ниже поверхности жидкости (рис. 5, точка  $A$ ), чтобы движение шарика было равномерным. Конец отсчета при достижении шариком дна (рис. 5, точка  $B$ ).
4. Повторить измерения для каждого шарика в каждой жидкости 5 раз, протирая каждый раз шарик перед измерением.
5. Шарик, упавший на дно сосуда, извлекается магнитом.

Таблица 2

№ п/п	$\delta_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$\delta_2$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$d$ , м	$l$ , м	$t$ , с	$R$ , м	$\eta$ , Па·с
1 ... 5								
1 ... 5								

## Задание к работе

Посчитать  $\eta$  для масла и глицерина. Подсчет провести 5 раз по формуле (15) или (17); отдельно подсчитать поправочный коэффициент:

$$\frac{1}{1 + 2,4 \frac{r}{R}}$$

6. Сделать вывод.

## Контрольные вопросы и задания для самоподготовки

1. Какой основной метод описания движения жидкости применяется в гидроаэродинамике?
2. Какое течение жидкости называют установившимся, неустановившимся, ламинарным, турбулентным?
3. Что называют линией тока, трубкой тока, струей?

4. Что называют пограничным слоем? Назовите причины его возникновения.

5. Запишите и объясните формулу Ньютона. Дайте определение физическому смыслу динамической вязкости. В каких единицах она измеряется?

6. Сформулируйте закон Стокса. От чего зависит коэффициент вязкости жидкости? Назовите единицу его измерения в системе СИ.

7. Чему равно число Рейнольдса?

8. Выведите рабочую формулу (15).

9. Объясните причины возникновения силы лобового сопротивления тела, движущегося в жидкости. В каком случае эта сила равна нулю?

10. Что называют подъемной силой? Чем она обусловлена?



## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. М.: Высш. шк., 2001.
2. Детлаф, А. Н. Курс физики. Т. 1. / А. Н. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высш. шк., 2002.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики: в 5-ти кн. Кн. 1. Механика / И. В. Савельев. – М. : Астрель-АСТ, 2001.
4. Зисман, Г. А. Курс общей физики. Т. 1 / Г. А. Зисман, С. М. Тодес – М. : Наука, 2000.

Учебно-методическое издание

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА**

*Методические указания*

Составители:

**Харьков** Антон Михайлович  
**Ситников** Максим Николаевич

Редактор *Т. А. Ермолаева*

Оригинал-макет и верстка *О. В. Булатниковой*

Подписано в печать 10.05.2017. Формат 60×84/16. Бумага офисная.  
Печать плоская. Усл.-п. л. 1,2. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 50 экз.  
Заказ . С 844.

Санитарно-эпидемиологическое заключение  
№ 24.49.04.953.П.000032.01.03 от 29.01.2003 г.

Редакционно-издательский отдел СибГУ им. М. Ф. Решетнева.  
Отпечатано в редакционно-издательском центре  
СибГУ им. М. Ф. Решетнева.  
660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.