

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ**

М.Л. Хазиев, Р.Р. Рахимов,
С.В. Болдырев, И.Х. Исрафилов

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ПО
МЕТОДУ СТОКСА**

Учебно-методическое пособие

Набережные Челны

2025

УДК 532.133(075.8)(076.5)
ББК 22.365.58я73-5
О-62

*Печатается по рекомендации учебно-методической комиссии
Высшей технической школы Набережночелнинского института (филиала)
Казанского (Приволжского) федерального университета
(протокол № 1.3.2.37-01/01 от 26.05.2025 г.)*

Рецензенты:

к.т.н., доцент кафедры высокоэнергетических процессов и агрегатов
НЧИ КФУ **А. В. Болдырев**
к.т.н., доцент кафедры физики НЧИ КФУ **Х. К. Тазмеев**

О62 **Определение коэффициента вязкости жидкости по методу Стокса:**
учебно-методическое пособие / М.Л. Хазиев, Р.Р. Рахимов, С.В. Болдырев,
И.Х. Исрафилов – Набережные Челны: Отдел информации и связей с
общественностью Набережночелнинского института Казан. федерал. ун-та,
2025. – 13 с.

Учебное пособие написано в соответствии с рабочей учебной программой дисциплин. Методические указания могут быть использованы для проведения лабораторных занятий по дисциплине «Физико-химические основы водоподготовки» для студентов по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и по дисциплине «Механика жидкости и газа» для студентов по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование».

УДК 532.133(075.8)(076.5)
ББК 22.365.58я73-5

© М.Л. Хазиев, Р.Р. Рахимов, С.В. Болдырев, И.Х. Исрафилов
© Набережночелнинский институт КФУ, 2025

Содержание

Определение коэффициента вязкости жидкости по методу Стокса	4
Теоретические основы	4
Методика эксперимента	6
Описание установки.....	8
Определение коэффициента вязкости жидкости	10
Контрольные вопросы.....	11
Литература	12

Лабораторная работа

Определение коэффициента вязкости жидкости по методу Стокса

Цель работы: изучение явления внутреннего трения в жидкости и измерение коэффициента вязкости жидкости по скорости падения в ней шарика.

Теоретические основы

При движении жидкости между слоями возникают силы внутреннего трения, которые стремятся уровнять скорости всех слоев жидкости. Пусть два ближайших слоя жидкости, находящихся на расстоянии Δz друг от друга, движутся по оси X с различными скоростями, отличающимися на величину ΔV (рис.1).

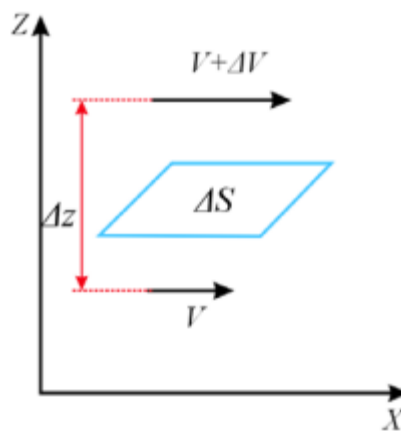


Рисунок 1– Разница скоростей слоёв жидкости

Тогда на площадку ΔS между этими слоями будет действовать сила внутреннего трения (вязкости), величина которой равна:

$$F = \mu \cdot \frac{\Delta V}{\Delta z} \cdot \Delta S, \quad (1)$$

где

μ – так называемый динамический коэффициент внутреннего трения или просто динамический коэффициент вязкости, значение которого зависит от свойств жидкости и от температуры. $\frac{\Delta V}{\Delta z}$ – так называемый поперечный градиент скорости, он показывает, как изменится скорость потока в направлении оси Z .

Решая уравнение (1) относительно μ , находим:

$$\mu = \frac{F}{\frac{\Delta V}{\Delta z} \cdot \Delta S}, \quad (2)$$

Следовательно, коэффициент внутреннего трения численно равен силе, действующей на единицу площади при градиенте скорости, равном единице. Размерность коэффициента внутреннего трения в системе СИ следующая:

$$[\eta] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \right] = [\text{Па} \cdot \text{с}]$$

Единица коэффициента внутреннего трения в системе СИ – Па·с. В системе измерений СГС (сантиметр-грамм-секунда) коэффициент динамической вязкости измеряется в Пузах [П], один пуаз равен: 1П = 0,1 Па·с.

Коэффициент вязкости является одной из важнейших характеристик смазочных материалов. Вязкость зависит от температуры, причем характер этой зависимости для жидкостей с увеличением температуры уменьшается. Особенно сильно от температуры зависит вязкость масел. Например, вязкость касторового масла в интервале 18 — 40 °С падает в четыре раза. Течение называется ламинарным (слоистым), если вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними, и турбулентным (вихревым), если вдоль потока происходит интенсивное вихреобразование и перемешивание жидкости (газа). Ламинарное течение жидкости наблюдается при небольших скоростях ее движения. Внешний слой жидкости, примыкающий к поверхности трубы, в которой она течет, из-за сил молекулярного сцепления прилипает к ней и остается неподвижным. Скорости последующих слоев тем больше, чем больше их расстояние до поверхности трубы, и наибольшей скоростью обладает слой, движущийся вдоль оси трубы. При турбулентном течении частицы жидкости приобретают составляющие скоростей, перпендикулярные течению, поэтому они могут переходить из одного слоя в другой. Скорость частиц жидкости быстро возрастает по мере удаления от поверхности трубы, затем изменяется довольно незначительно. Так как частицы жидкости переходят из одного слоя в другой, то их скорости в различных слоях мало отличаются. Из-за большого градиента скоростей у поверхности трубы обычно происходит образование вихрей. Профиль усреднённой скорости при турбулентном течении в трубах (рис. 2) отличается от параболиче-

ского профиля при ламинарном течении более быстрым возрастанием скорости у стенок трубы и меньшей кривизной в центральной части течения.

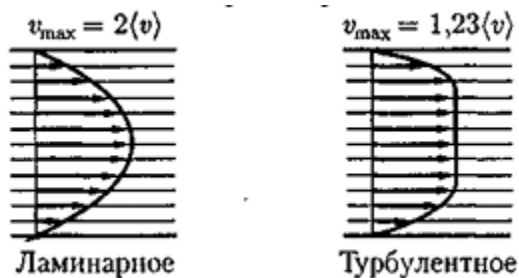


Рисунок 2 – Профили усреднённой скорости

Характер течения зависит от безразмерной величины, называемой числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho \cdot \vartheta \cdot d}{\mu}, \quad (3)$$

где

ρ — плотность жидкости;

ϑ — средняя по сечению трубы скорость жидкости;

d — характерный линейный размер, например, диаметр трубы или как в данной работе диаметр шарика;

При малых значениях числа Рейнольдса (при $Re \leq 2300$) наблюдается ламинарное течение, переход от ламинарного течения к турбулентному происходит при $Re > 2300$. Если число Рейнольдса одинаково, то режим течения различных жидкостей в трубах разных сечений одинаков.

Существует много способов определения коэффициента вязкости. Одним из наиболее простых и распространенных является способ, основанный на измерении скорости падения шарика в жидкости, который получил название метода Стокса.

Методика эксперимента

Для определения коэффициента динамической вязкости жидкости в работе используется метод Стокса, основанный на измерении скорости падения шарика в жидкости. Стокс установил, что при небольших скоростях движения, то есть при малых значениях числа Рейнольдса, сила сопротивления, с которой действует

жидкая среда на движущееся в ней твердое тело, пропорциональна коэффициенту динамической вязкости жидкости μ , скорости v движения тела относительно жидкости и характерному размеру тела l . Коэффициент пропорциональности зависит от формы тела. Для шара, если в качестве l взять радиус шара r , коэффициент пропорциональности оказывается равным 6π . Следовательно, сила сопротивления движению шарика в жидкостях при небольших скоростях в соответствии с формулой Стокса равна:

$$F_{\text{сопр}} = 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r \cdot v \quad (4)$$

Формула (5) получена в предположении, что расстояние от тела до границ жидкости, в данном опыте до стенок сосуда, значительно больше размеров тела $r \ll R$.

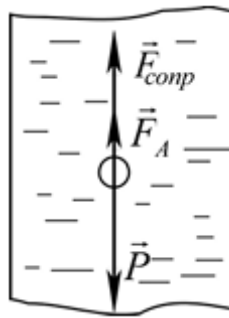


Рисунок 3 – Силы, действующие на шарик

На падающий в жидкости шарик действуют три силы (рис. 3):

- сила сопротивления среды $F_{\text{сопр}}$ определяемая (4),
- сила тяжести:

$$P = m \cdot g = \rho_1 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot g \quad (5)$$

- выталкивающая сила Архимеда:

$$F_A = \rho_2 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot g \quad (6)$$

где

ρ_1 и ρ_2 – плотности материала шарика и жидкости соответственно. Второй закон Ньютона для падающего шарика запишется в виде:

$$P - F_A - F_{\text{сопр}} = m \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \quad (7)$$

Вначале движение шарика будет ускоренным $\frac{d\vartheta}{dt} > 0$, но так как сила сопротивления, согласно формуле Стокса, увеличивается с увеличением скорости падения, то при некоторой скорости ϑ_0 левая и правая части уравнения движения (7) обратятся в нуль, и движение шарика станет равномерным

$$\frac{d\vartheta}{dt} = 0 \quad (8)$$

Параметры установки подобраны таким образом, чтобы движение шарика установилось, когда он при своём падении достигнет верхней метки (рис. 4). Тогда скорость равномерного движения определяется из соотношения:

$$\vartheta_0 = \frac{h}{t} \quad (9)$$

где

h и t – расстояние между верхней и нижней метками и время, за которое это расстояние пройдено. Подставляем выражение для сил (4) – (6) в уравнение (7) и при условии (8) получим:

$$\rho_1 \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot g - \rho_2 \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot g - 6\pi \cdot \mu \cdot r \cdot \vartheta_0 = 0 \quad (10)$$

откуда с учётом (9) находим коэффициент динамической вязкости:

$$\mu = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2) \cdot g \cdot r^2 \cdot t}{h} \quad (11)$$

Таким образом, определение коэффициента динамической вязкости жидкости сводится к измерению радиуса шарика и скорости его равномерного падения в жидкости, плотности материала шарика и жидкости считаются известными.

Описание установки

Для проведения опыта используют цилиндрический стеклянный сосуд, заполненный жидкостью, для которой определяем вязкость, шарики малых размеров, весы, масштабную линейку с миллиметровыми делениями, пинцет, термометр, весы. Схема установки представлена на рис. 4.

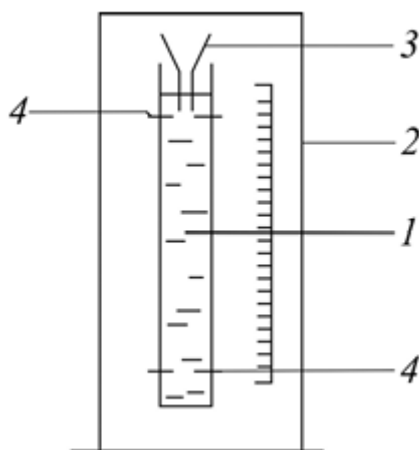


Рисунок 4 – Схема установки

На цилиндрической части сосуда 1 нанесены две кольцевые метки 4 – верхняя и нижняя. Расстояние между ними определяется по масштабной линейке 2. В верхней части сосуда установлена воронка 3, обеспечивающая падение шарика вдоль оси цилиндра.

Цилиндрический сосуд заливается испытываемой жидкостью выше уровня верхней метки.

Порядок выполнения работы

1. Установите плотности материала шариков ρ_1 и жидкости ρ_2 объёмно-весовым методом.
2. Измерьте с помощью масштабной линейки с точностью до 1 мм расстояние h между метками на цилиндрическом сосуде.
3. С помощью термометра определите температуру, при которой проводится измерение коэффициента вязкости жидкости.
4. Измерьте диаметр каждого шарика в трех различных местах. Определите среднее значение его радиуса.
5. Пинцетом опустите шарик, не сообщая ему начальной скорости, в воронку и наблюдайте за ним. При прохождении шариком верхней метки включите секундомер, при прохождении нижней выключите его.

Определение коэффициента вязкости жидкости

1. Запишите значения $\rho_1 = \dots \text{кг/м}^3$, $\rho_2 = \dots \text{кг/м}^3$, $t^\circ = \dots^\circ \text{C}$ и $h = \dots \text{м}$ согласно пунктам 1, 2, 3 порядка выполнения работы.

2. Выполните пункты 4, 5 порядка выполнения работы для пяти шариков. Результаты всех измерений занесите в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерений и вычислений

	Шарик 1	Шарик 2	Шарик 3	Шарик 4	Шарик 5	Средние значения
$r, \text{м}$						
$r^2, \text{м}^2$						
$t, \text{с}$						
$t^2, \text{с}^2$						

3. Вычислите средние значения и впишите в табл. 1:

$$\langle r \rangle = \dots; \langle r^2 \rangle = \dots; \langle t \rangle = \dots; \langle t^2 \rangle = \dots;$$

4. Определите среднеквадратичные погрешности определения для радиуса шарика $S_{\langle r \rangle}$ и времени падения $S_{\langle t \rangle}$ по формулам:

$$S_{\langle r \rangle} = \sqrt{\frac{\langle r^2 \rangle - \langle r \rangle^2}{n-1}}, \quad (12)$$

$$S_{\langle t \rangle} = \sqrt{\frac{\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2}{n-1}}, \quad (13)$$

где

n – число проведённых экспериментов (количество брошенных шариков).

5. Рассчитайте среднее значение коэффициента вязкости жидкости:

$$\langle \mu \rangle = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2) \cdot g \cdot \langle r \rangle^2 \cdot \langle t \rangle}{h} \quad (14)$$

6. Рассчитайте среднеквадратичную погрешность определения:

$$S_{\langle \mu \rangle} = \langle \mu \rangle \cdot \sqrt{\left(2 \cdot \frac{S_{\langle r \rangle}}{\langle r \rangle}\right)^2 + \left(\frac{S_{\langle t \rangle}}{\langle t \rangle}\right)^2} \quad (15)$$

7. Окончательный результат представьте в виде:

$$\mu = \langle \mu \rangle \pm S_{\langle \mu \rangle} \quad (16)$$

8. Используя формулу (4) определите число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (17)$$

Контрольные вопросы

1. Силы внутреннего трения и их природа. От каких факторов зависит коэффициент динамической вязкости?
2. Напишите формулу Ньютона для сил внутреннего трения. Поясните понятие градиента скорости течения жидкости с помощью рисунка.
3. Объясните метод Стокса определения вязкости жидкости и дайте вывод формулы (11).
4. Как различаются течения ламинарное и турбулентное?

Литература

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: учебник / Д. В. Сивухин; т. 5, ч. 1. — Москва: Наука, 1980. — и другие издания.
2. Трофимова, Т. И. Курс физики: учебное пособие / Т. И. Трофимова. — 11-е издание, стереотипное. — Москва: Академия, 2006. — 560 с.
3. Детлаф, А. А.; Яворский, Б. М. Курс физики: учебник / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. — Москва: Высшая школа, 2002.

Учебное издание

Хазиев Марат Люцерович

Рахимов Радик Рафисович

Болдырев Сергей Владимирович

Исрафилов Ирек Хуснемарданович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ПО МЕТО- ДУ СТОКСА

Учебно-методическое пособие

Редактор

Г.Ф. Таипова

Компьютерная верстка

Д.О. Мещеряков

Подписано в печать 26.06.2025

Бумага офсетная. Печать ризографическая.

Формат 60×84 1/16. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 0,8. Уч.-изд. л. 0,3. Тираж 50 экз. Заказ 1880

Отпечатано в отделе информации и связей с общественностью

Набережночелнинского института

Казанского (Приволжского) федерального университета