

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева»

Кафедра теплоэнергетики

И.В. Дворовенко
А.Р. Богомоллов

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ПОДОБИЕ ПРИ ДВИЖЕНИИ ТЕЛ В ЖИДКОСТЯХ

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине
«Механика жидкости и газа. Основы теплогазоснабжения и венти-
ляции» для студентов направления подготовки
08.03.01 Строительство всех форм обучения

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления под-
готовки бакалавров 08.03.01 Строительство в качестве электронно-
го издания для выполнения лабораторной работы студентами всех
форм обучения

Кемерово 2019

Рецензент:

Темникова Е.Ю. – к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики.

Дворовенко Игорь Викторович, Богомолов Александр Романович. Гидродинамическое подобие при движении тел в жидкостях [Электронный ресурс]: методические указания к выполнению лабораторной работы для студентов направления подготовки бакалавров 08.03.01 Строительство, всех форм обучения / И.В. Дворовенко, А.Р. Богомолов. – Кемерово: КузГТУ, 2019. – Систем. требования: Pentium IV ; ОЗУ 8 Гб ; Windows XP ; (CD-ROM-дискпровод); мышь. - Загл. с экрана.

Методические указания к выполнению лабораторной работы составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Механика жидкости и газа. Основы теплогазоснабжения и вентиляции» и предназначены для студентов направления подготовки бакалавров 08.03.01 Строительство всех форм обучения.

© КузГТУ
Дворовенко И.В.,
Богомолов А.Р.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является закрепление знаний по разделам «Гидродинамическое подобие» и «Движение частиц в жидкостях». Задачей исследования является получение степенной зависимости между критериями подобия, оказывающими влияние на движение частиц в жидкостях.

В ходе работы студенты выбирают материал осаждающихся частиц, их размеры; среду, в которой происходит осаждение; задают температуру среды; измеряют время осаждения частиц. По результатам измерений и расчетов получают критериальные степенные зависимости для разных режимов осаждения, оценивают области применения полученных зависимостей, сопоставляют результаты с теоретическими уравнениями.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Движение частиц в какой-либо текучей среде может происходить под действием различных сил: силы тяжести, центробежной силы, силы лобового сопротивления при набегающем потоке. В лабораторной работе движение происходит в неподвижной среде под действием силы тяжести. В этом случае движущей силой процесса является разность плотностей частицы и среды: если плотность частицы будет больше плотности среды, то частица будет осаждаться; если плотность среды больше, то частица будет всплывать.

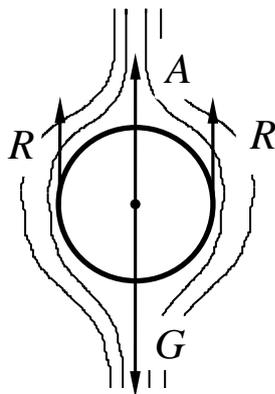


Рис.1. Действие сил на частицу, движущуюся в неподвижной среде

При движении частицы в среде на нее действуют три силы (рис.1): сила тяжести G , подъемная (архимедова) сила A и сила сопротивления среды (сила лобового сопротивления) R , рассчитываемые по уравнениям:

$$\begin{aligned} G &= mg, \\ A &= m_L g, \\ R &= \xi S \frac{\rho_L w^2}{2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где m – масса тела (частицы), кг; m_L – масса жидкости в объеме тела, кг; S – площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению его движения, м²; w – скорость осаждения частицы, м/с; ρ_L – плотность среды, кг/м³; ξ – коэффициент сопротивления среды.

Для шарообразных частиц диаметром d и плотностью ρ можно записать следующие выражения для сил, действующих на частицу:

$$\begin{aligned} G &= \frac{\pi d^3}{6} \rho g, \\ A &= \frac{\pi d^3}{6} \rho_L g, \\ R &= \xi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_L w^2}{2}. \end{aligned} \quad (1)$$

В начальный момент движения частицы скорость ее движения будет возрастать. С увеличением скорости будет расти сопротивление движению частицы и соответственно уменьшаться ее ускорение. В результате через короткий промежуток времени наступит динамическое равновесие: сила тяжести, под действием которой частица движется, будет равна сумме архимедовой силы и силы сопротивления среды:

$$G = A + R. \quad (2)$$

Если равнодействующая сил равна нулю, то частица движется равномерно с постоянной скоростью, называемой скоростью осаждения. Движение частицы может быть ламинарным, турбулентным или происходить в переходной области.

При ламинарном движении частицы сила сопротивления среды R может быть рассчитана по закону Стокса:

$$R = 3\pi\mu_L dw, \quad (3)$$

где μ_L – вязкость среды, Па·с.

Подставив значения сил G и A из уравнения (1), а R из уравнения (3) в уравнение (2), получим уравнение для расчета скорости при ламинарном движении частицы в среде:

$$\begin{aligned} \frac{\pi d^3}{6} \rho g &= \frac{\pi d^3}{6} \rho_L g + 3\pi\mu_L dw \Rightarrow \\ w &= \frac{d^2 g (\rho - \rho_L)}{18\mu_L}. \end{aligned} \quad (4)$$

В общем виде скорость осаждения можно найти, подставив в уравнение (2) значения сил из уравнения (1):

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho g = \frac{\pi d^3}{6} \rho_L g + \xi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_L w^2}{2},$$

откуда

$$w = \sqrt{\frac{4dg(\rho - \rho_L)}{3\xi\rho_L}}. \quad (5)$$

В выражение (3) входит коэффициент сопротивления ξ , зависящий от режима осаждения, т.е. от значения критерия Рейнольдса

$$Re = \frac{wd\rho_L}{\mu_L}, \quad (6)$$

При $Re < 2$ имеет место ламинарный режим осаждения. Приравняв уравнения (1) и (3) для силы сопротивления, получим

$$\xi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_L w^2}{2} = 3\pi\mu_L dw \Rightarrow \xi = 24 \frac{\mu_L}{wd\rho_L}$$

или

$$\xi = \frac{24}{Re}.$$

При $2 < Re < 500$ – переходный режим

$$\xi = \frac{18,5}{Re^{0,6}},$$

при $500 < Re < 2 \cdot 10^5$ – область развитой турбулентности, ξ не зависит от Re (автомодельный режим)

$$\xi = 0,44.$$

Подставляя указанные значения ξ в уравнение (5), находим выражения для скорости свободного осаждения частицы [1]:

– при ламинарном режиме получится уравнение (4),

– при переходном режиме

$$w = 0,781 \frac{d^{1,14} (\rho - \rho_L)^{0,714}}{\rho_L^{0,286} \mu_L^{0,429}}, \quad (7)$$

– при турбулентном режиме

$$w = 5,46 \sqrt{\frac{d(\rho - \rho_L)}{\rho_L}}. \quad (8)$$

С целью обобщения экспериментальных данных и применения полученных результатов на другие вещества частиц и жидкостей и даже другие диапазоны скоростей движения частиц исполь-

зуют методы теории подобия. Для получения обобщенных зависимостей необходимо представить уравнения (4, 7, 8) в виде зависимостей критериев подобия – обобщенных величин, являющихся мерами соотношения между двумя силами, существенными для рассматриваемого процесса.

Для описания процессов движения тел в жидкостях используют критерий гидродинамического подобия – критерий Re , который показывает меру отношения сил инерции к силам вязкого трения и критерий Ar (критерий Архимеда), являющийся мерой отношения произведения силы инерции и архимедовой силы к квадрату силы трения. Критерий Ar является производным критерием подобия и получается делением квадрата критерия Рейнольдса на критерий Фруда (Fr), который показывает меру отношения силы инерции к силе тяжести:

$$Fr = \frac{w^2}{gd}.$$

Кроме того, в выражение критерия Ar входит относительная движущая сила: отношение разности плотностей частицы и жидкости к плотности жидкости $(\rho - \rho_L)/\rho_L$:

$$Ar = \frac{Re^2}{Fr} \frac{\rho - \rho_L}{\rho_L} = \left(\frac{wd\rho_L}{\mu_L} \right)^2 \frac{gd}{w^2} \frac{\rho - \rho_L}{\rho_L} = \frac{gd^3 \rho_L (\rho - \rho_L)}{\mu_L^2}. \quad (9)$$

При решении прямой задачи: определения скорости движения по заданным размерам частицы определяющим критерием является критерий Ar , а определяемым – критерий Re , в который входит скорость движения частицы w . При решении обратной задачи: определения диаметра частицы, движущейся с заданной скоростью, вводится еще один производный критерий – критерий Лященко (Ly), в котором собраны четыре силы: тяжести, архимедова, трения и сила инерции (в кубе). Критерий Ly получается делением критерия Re , взятого в кубе, на критерий Ar :

$$Ly = \frac{Re^3}{Ar} = \left(\frac{wd\rho_L}{\mu_L} \right)^3 \frac{\mu_L^2}{gd^3 \rho_L (\rho - \rho_L)} = \frac{w^3 \rho_L^2}{g\mu_L (\rho - \rho_L)}. \quad (10)$$

При решении обратной задачи критерий Ly является определяющим, а критерии Re или Ar – определяемыми.

Использование в качестве определяющих критериев Ar и Ly позволяет избежать последовательных приближений при расчетах и проверки режима движения частицы, т.к. критерий Ar содержит

только размер частиц и физические свойства среды и частицы, а критерий Ly содержит скорость движения частицы и физические свойства.

Прямая задача решается, когда необходимо определить скорость осаждения частиц и, следовательно, время пребывания запыленного газа в осадительном аппарате; обратная задача позволяет определить скорость набегающего потока при расчете уноса частиц.

Критериальные зависимости, связывающие между собой определяющие и определяемые критерии можно получить, выразив в уравнении (5) коэффициент сопротивления среды:

$$\xi = \frac{4dg(\rho - \rho_L)}{3w^2\rho_L}.$$

Выделяя в этом уравнении критерии подобия, получим: зависимость критерия Re от критерия Ar :

$$\xi = \frac{4dg(\rho - \rho_L)}{3w^2\rho_L} = \frac{4}{3} \left(\frac{gd^3\rho_L(\rho - \rho_L)}{\mu_L^2} \right) \left(\frac{\mu_L^2}{w^2d^2\rho_L^2} \right) = \frac{4}{3} Ar \frac{1}{Re^2}$$

откуда
$$\xi Re^2 = \frac{4}{3} Ar; \quad (11)$$

зависимость критерия Re от критерия Ly :

$$\xi = \frac{4dg(\rho - \rho_L)}{3w^2\rho_L} = \frac{4}{3} \left(\frac{g\mu_L(\rho - \rho_L)}{w^3\rho_L^2} \right) \left(\frac{wd\rho_L}{\mu_L} \right) = \frac{4}{3} \frac{1}{Ly} Re$$

откуда
$$Re = \frac{3}{4} \xi Ly; \quad (12)$$

зависимость критерия Ar от критерия Ly можно получить, решая совместно уравнения (11) и (12):

$$Ar = \left(\frac{3}{4} \xi \right)^3 Ly^2. \quad (13)$$

Для расчета скорости осаждения (прямая задача движения частиц в жидкостях) применяют единую интерполяционную зависимость, связывающую критерии Re и Ar , для всех режимов осаждения

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,575\sqrt{Ar}}. \quad (14)$$

Используя теоремы подобия можно заключить:

1. согласно первой теореме подобия: подобные явления характеризуются численно равными критериями подобия, для получения

критериального уравнения при проведении опытов следует измерять величины, которые входят в критерии подобия: размер частиц, плотность материала частиц и текучей среды, вязкость среды, скорость движения частиц;

2. согласно второй теореме подобия, обработка полученных экспериментальных данных должна быть представлена в виде степенных зависимостей между критериями подобия, подобных уравнениям (11-13).

3. согласно третьей теореме подобия определяется область применения полученных уравнений.

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ (ВИРТУАЛЬНОЙ) УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на компьютере. Виртуальная лабораторная установка (рис. 2) состоит из четырех цилиндров 1, заполняемых различными средами, в которых осаждаются частицы 2, таймера 3, кнопки запуска/остановки 4 для измерения времени осаждения частиц, списков выбора рабочих сред 5 и материалов частиц 6, регуляторов температуры среды 7 и диаметров частиц 8, термометра 9 для измерения температуры среды.

Рабочую среду в цилиндрах 1 выбирают из списка 5. Для этого нужно установить курсор мыши на кнопке справа от списка и щелкнуть левой клавишей мыши, из раскрывшегося списка выбрать вещество, установив на него курсор мыши и еще раз щелкнув левой клавишей. После этого в окне списка появится выбранная рабочая среда. На выбор студенту предлагается несколько рабочих сред. Материал частиц выбирают из списка 6 аналогично выбору рабочего вещества. Температуру рабочей среды задают регулятором 7. Для увеличения температуры нужно установить курсор мыши на верхнюю кнопку регулятора и щелкнуть левой клавишей мыши, для уменьшения температуры – на нижнюю кнопку регулятора. Значение температуры рабочей среды показывает термометр 9. Температура может изменяться в диапазоне от 0 до 100°C. Диаметры частиц задают регулятором 8, минимальный диаметр частицы 0,75 мм, максимальный – 16 мм. При нажатии на левую или правую кнопку регулятора значения диаметров частиц устанавливаются таким образом, что соотношение максимального и минимального

диаметров для одного опыта может быть равно 2 или 4. Значение диаметра осаждаемой частицы в миллиметрах указываются индикатором 11 над соответствующим цилиндром.

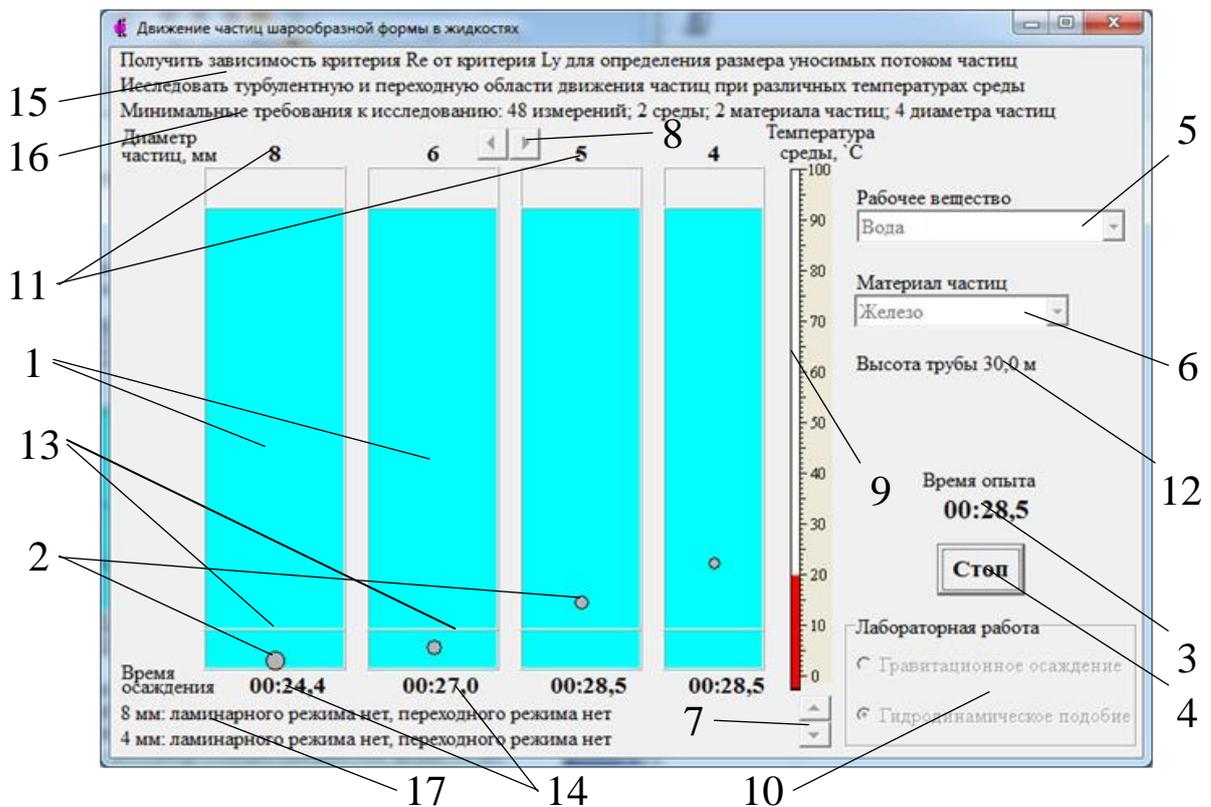


Рис. 2. Вид виртуальной лабораторной установки:

1 – цилиндры с рабочей средой; 2 – частицы; 3 – таймер; 4 – кнопка запуска/остановки; 5 – список рабочих сред; 6 – список материалов частиц; 7 – регулятор температуры рабочей среды; 8 – регулятор диаметров частиц; 9 – термометр для измерения температуры рабочей среды; 10 – вид лабораторной работы; 11 – размеры частиц; 12 – высота осаждения частиц; 13 – нижняя отметка; 14 – индикатор времени осаждения; 15 – задача исследования; 16 - минимальные требования к исследованию; 17 – подсказка о возможных режимах движения частиц

При выборе рабочей среды, материала и диаметров частиц, задании температуры автоматически устанавливается высота осаждения частиц, которая равна расстоянию от начального положения частиц до нижней отметки 13. Значение высоты осаждения показывается в поле 12. Для начала движения частиц и включения секундомера нажимают кнопку запуска 4. Определение времени осаждения производят нажатием кнопки остановки 4 в момент касания частицей нижней отметки 13, т.е. когда частица преодолит всю

высоту осаждения. Время осаждения в минутах, секундах, десятых долях секунды фиксируется под цилиндрами 2 (индикаторы 14). В процессе проведения опыта списки 5, 6 и регуляторы 7, 8 не доступны. Установка вновь готова для проведения эксперимента, когда частицы появятся на верхней отметке.

Для выбора заданных условий опытов (например, проведение исследований в ламинарной области движения) в поле 17 выдается подсказка о возможных режимах движения частиц в зависимости от температуры среды для максимального и минимального выбранных диаметров частиц.

4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Перед выполнением работы студент должен знать теоретические положения изучаемого явления, ознакомиться с оборудованием лабораторной работы, изучить порядок проведения работы. До начала работы нужно подготовить бланк «Журнал наблюдений» по образцу приложения.

Работу выполняют в следующей последовательности:

1. Запускают приложение «*Гравитационное осаждение шарообразных частиц*». На экране компьютера появится окно программы, аналогичное рис. 2.
2. Выбирают вид лабораторной работы «Гидродинамическое подобие» в окне 10.
3. В поле 15 указывается задача исследования, в поле 16 минимальные условия проведения экспериментов.
4. Выбирают рабочую среду из списка 5 и материал частиц из списка 6.
5. Выбирают диаметры частиц регулятором 8.
6. Задают температуру рабочей среды регулятором 7.
7. После запуска таймера 3 кнопкой запуска 4 частицы начнут двигаться вниз.
8. По достижении частицей нижнего края цилиндра таймер под цилиндром останавливают кнопкой остановки 4. Опыт продолжают до тех пор, пока все частицы не коснутся нижнего края цилиндров.
9. В журнал наблюдений записывают информацию о рабочей среде, материале и размерах частиц, показания термометра 9, секундомеров 3 и высоту осаждения частиц.

10. Минимальное число измерений для выполнения лабораторной работы указывается в поле 16.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Свойства материалов частиц и рабочих сред определяют из таблиц 3-13 приложения, на рис. 3-6 представлены зависимости плотности и вязкости рабочих сред от температуры.
2. Определяют среднее время осаждения частиц $\tau_{\text{ср}}$, как среднеарифметическое трех опытов.
3. Рассчитывают скорость осаждения по результатам опытов:

$$w_o = \frac{H}{\tau_{\text{ср}}},$$

где H – расстояние, пройденное частицей, м; $\tau_{\text{ср}}$ – время осаждения частицы, с; w_o – скорость осаждения, определенная по результатам замеров, м/с.

4. Определяют значение критериев Re по формуле (6), Ar по формуле (10), Lu по формуле (11).
5. Определяют режим осаждения.
6. Результаты расчетов заносят в таблицу.
7. По полученным данным строят критериальные зависимости согласно поставленной задаче исследования.
8. Определяют зависимость определяемого критерия от определяющего в виде степенного уравнения, рассчитывают значения определяемого критерия по полученному уравнению. При большом расхождении экспериментальных данных и полученной зависимости получают степенные уравнения для каждого режима осаждения (ламинарного, переходного и турбулентного).
9. Определяют теоретические критериальные зависимости для каждого режима движения частиц по уравнениям для скорости (4, 7 или 8) или общим критериальным уравнениям (11-13) с учетом уравнений для коэффициента сопротивления среды. По полученным критериальным уравнениям рассчитывают значения определяемого критерия.
10. Рассчитывают критерий Re по уравнению (14).
11. Полученные результаты представляют в виде графиков.

12. Сравнивают полученные экспериментальные и теоретические зависимости.
13. На основании проведенных исследований и выполненных расчетов делают анализ результатов работы.

6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет оформляется на листах бумаги формата А4 в соответствии со стандартами. Отчет должен содержать:

- а) титульный лист установленной формы;
- б) краткое изложение теоретических положений;
- в) принципиальную схему установки;
- г) таблицы «Журнал наблюдений» и «Результатов расчетов»;
- д) графики зависимостей согласно задаче исследования;
- е) анализ результатов работы.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют стабилизированным движением частицы в текучей среде?
2. Баланс сил при стабилизированном осаждении одиночной частицы.
3. Что такое коэффициент сопротивления среды, от чего он зависит?
4. Расчет скорости осаждения частицы.
5. Что такое критерий подобия?
6. Почему критерии подобия называют обобщенными переменными?
7. Определяющие и определяемые критерии подобия.
8. Какие критерии в проведенном исследовании являются определяющими, а какие определяемыми? Почему?
9. Определите физический смысл критериев Re , Ar , Ly .
10. Определите критические значения критериев Ar и Ly для ламинарного и турбулентного режимов движения.
11. Определите зависимость критерия Re от критерия Ar (Ly).

12. Рассчитайте скорость осаждения для любого опыта без использования уравнений (4, 7, 8) и данных по измерению времени осаждения.
13. Укажите последовательность расчетов для прямой или обратной задачи осаждения.
14. Постройте зависимость коэффициента сопротивления среды от критерия Re (Ar , Ly).

8. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия : учеб. пособие для студентов вузов / А. А. Гухман. - М. : ЛКИ , 2010. - 296 с.
2. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с
3. Афанасьев, Ю. О. Теория подобия: учебное пособие / Ю. О. Афанасьев, Н. В. Тиунова; ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева». - Кемерово, 2011 : Издательство КузГТУ. - 64 с.
4. Афанасьев, Ю. О. Газогидромеханика : учебное пособие / Ю. О. Афанасьев, Н. В. Тиунова; под ред. П. Т. Петрика; ГОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т». - Кемерово , 2009 : Издательство КузГТУ. - 133 с.

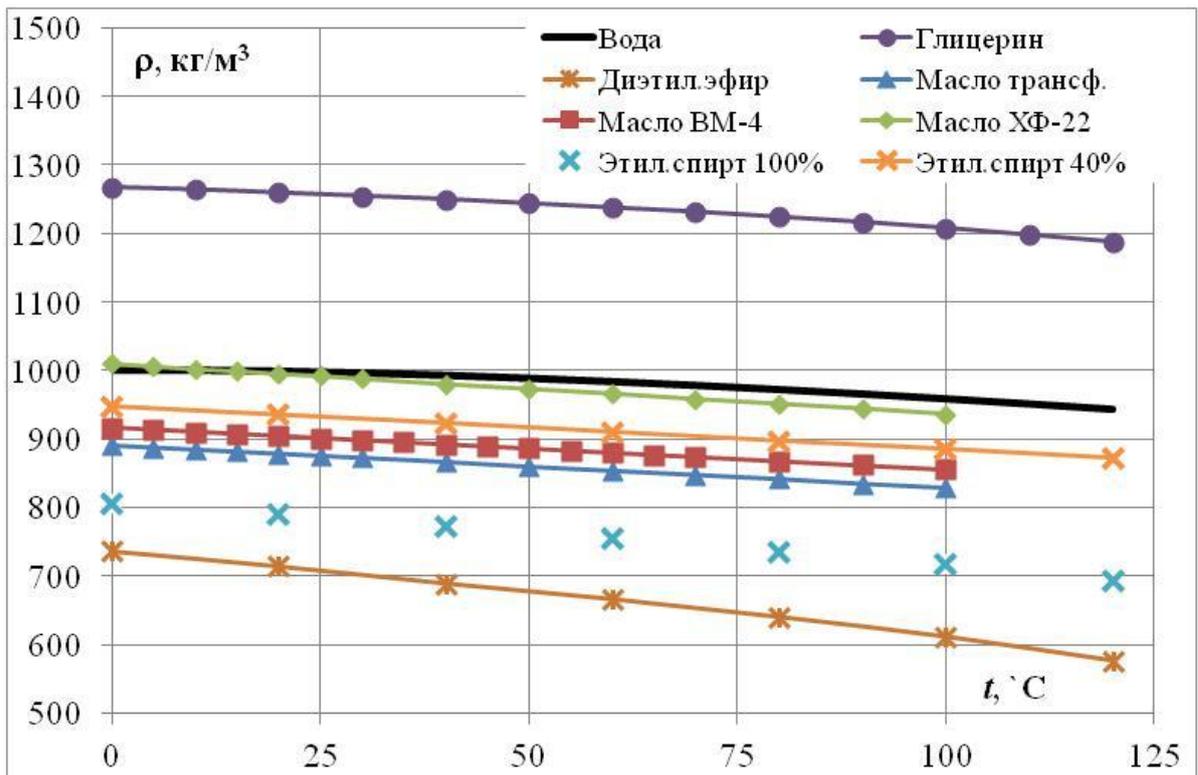


Рис. 3. Зависимость плотности жидкостей от температуры

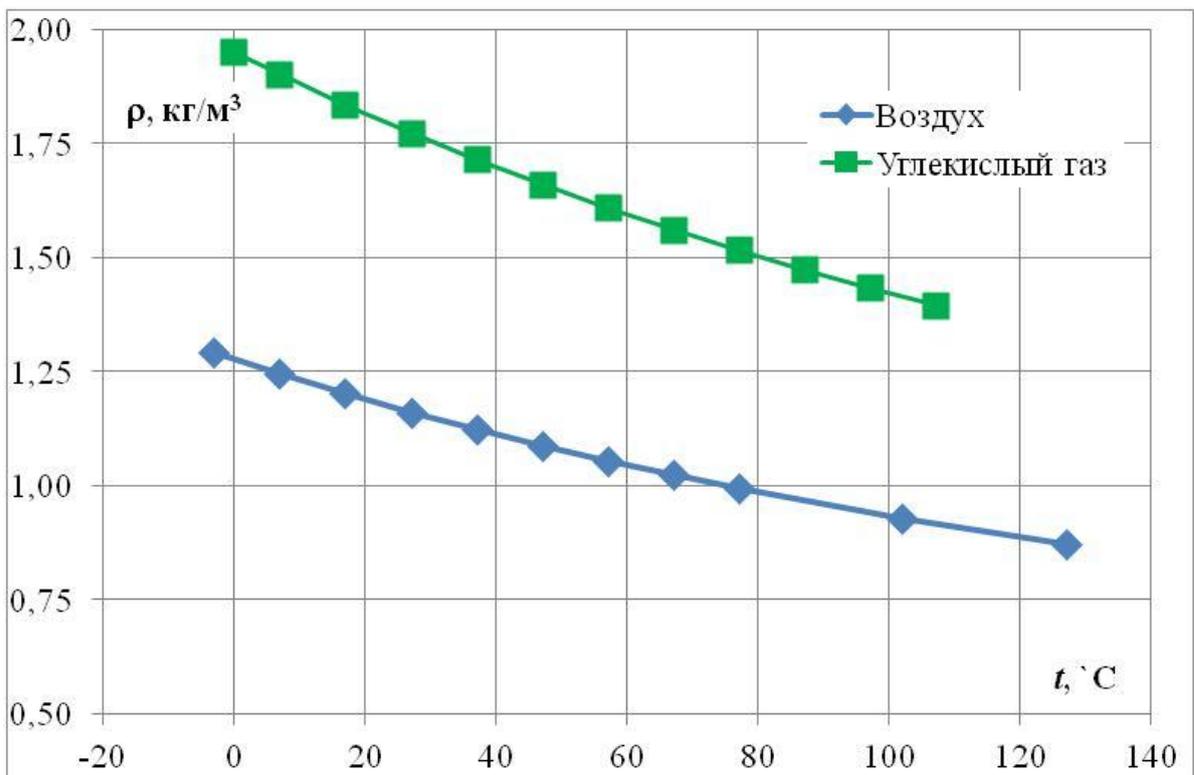


Рис. 4. Зависимость плотности газов от температуры

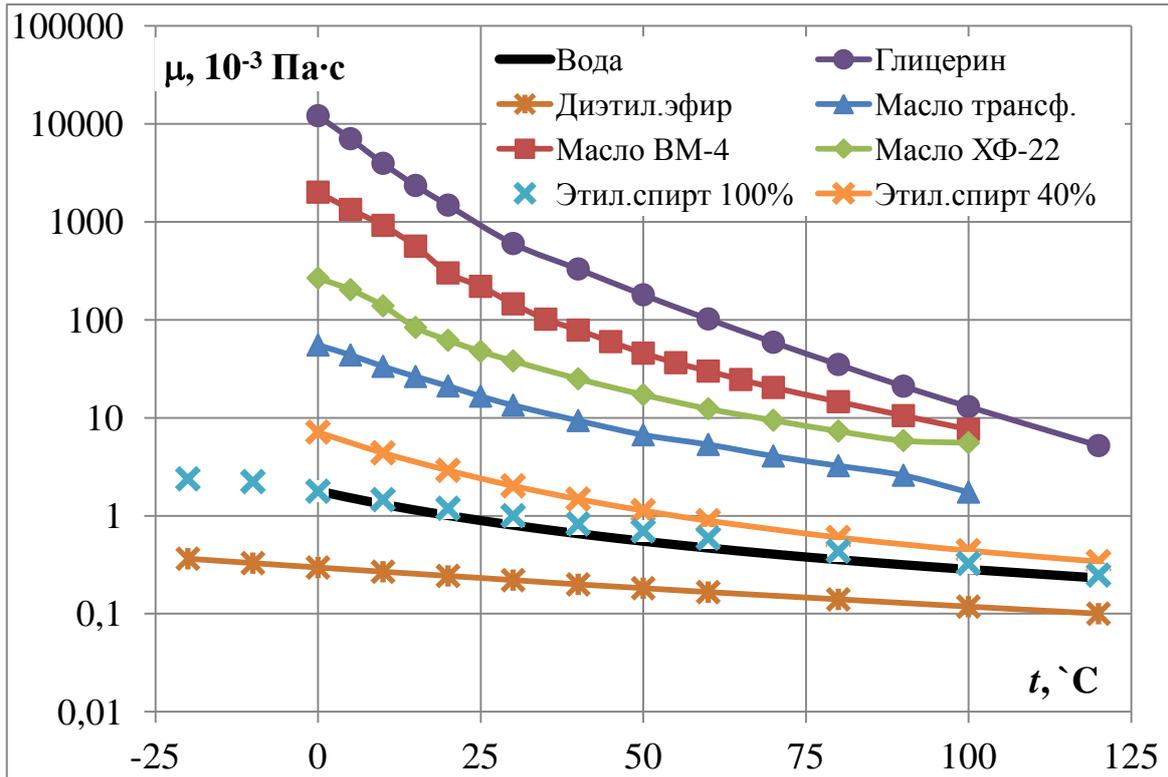


Рис. 5. Зависимость динамической вязкости жидкостей от температуры

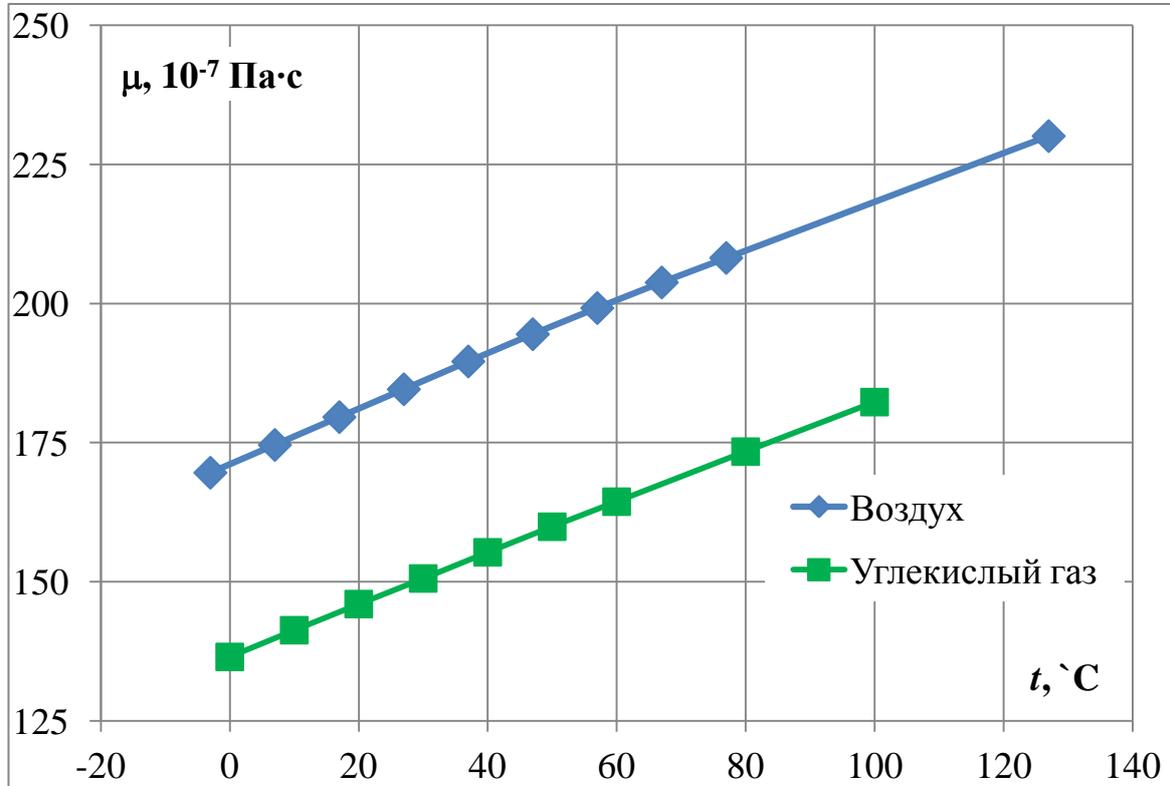


Рис. 6. Зависимость динамической вязкости газов от температуры

Таблица 3

Плотность и динамическая вязкость воды
при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мкПа}\cdot\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мкПа}\cdot\text{с}$
0	999,8	60	983,2	0	1792	60	466,8
5	1000,0	70	977,7	5	1521	70	404,4
10	999,7	80	971,6	10	1308	80	354,9
20	998,3	90	965,2	20	1003	90	314,9
30	995,7	100	958,1	30	797,7	100	282,1
40	992,3	110	950,7	40	653,1	110	254,9
50	988,0	120	942,9	50	547,0	120	232,1

Таблица 4

Плотность и динамическая вязкость воздуха
при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, 10^{-7}, \text{Па}\cdot\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, 10^{-7}, \text{Па}\cdot\text{с}$
0	1,2772	60	1,0458	0	171,2	60	200,5
10	1,2318	70	1,0154	10	176,2	70	205,2
20	1,1894	80	0,9869	20	181,2	80	209,8
30	1,1498	90	0,9599	30	186,1	90	214,3
40	1,1128	100	0,9343	40	191,0	100	218,7
50	1,0782	120	0,8866	50	195,8	120	227,2

Таблица 5

Плотность и динамическая вязкость глицерина
при различных температурах

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$
0	1267,4	50	1243,8	0	12100	50	180
5	1265,4	60	1237,6	5	7050	60	102
10	1264,2	70	1231,5	10	3950	70	59
15	1261,7	80	1223,9	15	2350	80	35
20	1259,4	90	1216,5	20	1480	90	21
30	1254,7	100	1207,7	30	600	100	13
40	1250,0	120	1187,6	40	330	120	5,2

Таблица 6

Плотность и динамическая вязкость диэтилового эфира
при различных температурах

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$
0	736,2	60	665,8	0	0,296	60	0,166
10	724,8	70	653,2	10	0,268	70	0,152
20	713,5	80	640,2	20	0,243	80	0,14
30	701,9	90	625	30	0,22	90	0,128
40	689,4	100	610,5	40	0,199	100	0,118
50	676,4	120	576,4	50	0,182	120	0,1

Таблица 7

Плотность и динамическая вязкость масла трансформаторного
при различных температурах

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$
0	891	50	860	0	55,24	50	6,708
5	888	60	854	5	43,73	60	5,338
10	885	70	848	10	33,45	70	4,07
20	879	80	842	20	21,1	80	3,242
30	873	90	835	30	13,44	90	2,588
40	867	100	829	40	9,364	100	1,741

Таблица 8

Плотность и динамическая вязкость масла ВМ-4
при различных температурах

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$
0	916	50	886	0	2 006	50	45,63
5	913	60	880	5	1 337	60	29,92
10	910	70	874	10	919,1	70	20,36
20	904	80	868	20	300,8	80	14,58
30	898	90	862	30	145,3	90	10,51
40	892	100	856	40	78,5	100	7,618

Таблица 9

Плотность и динамическая вязкость масла ХФ-22
при различных температурах

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ C$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$	$t, ^\circ C$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$
0	1010	50	973	0	266,6	50	17,22
5	1006	60	966	5	202,9	60	12,36
10	1002	70	958	10	138,7	70	9,436
20	995	80	951	20	61,78	80	7,313
30	988	90	944	30	38,04	90	5,853
40	980	100	936	40	24,97	100	5,569

Таблица 10

Плотность и динамическая вязкость углекислого газа
при различных температурах

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	T, K	$\mu \cdot 10^7, \text{Па}\cdot\text{с}$	T, K	$\mu \cdot 10^7, \text{Па}\cdot\text{с}$
273,15	1,9508	350	1,5168	270	135,9	350	174,9
280	1,9022	360	1,4743	280	140,8	360	179,7
290	1,8352	370	1,4341	290	145,8	370	184,4
300	1,7730	380	1,3961	300	150,7	380	189
310	1,7150	390	1,3600	310	155,6	390	193,7
320	1,6609	400	1,3257	320	160,5	400	198,2
330	1,6098	410	1,2932	330	165,3	410	202,8
340	1,5618	420	1,2623	340	170,1	420	207,2

Таблица 11

Плотность и динамическая вязкость этилового спирта, 100%
при различных температурах

$t, ^\circ C$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ C$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ C$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$	$t, ^\circ C$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$
0	806	50	763	0	1,78	50	0,701
10	798	60	754	10	1,46	60	0,591
20	789	80	735	20	1,19	80	0,435
30	781	100	716	30	1,00	100	0,325
40	772	120	693	40	0,825	120	0,248

Таблица 12

Плотность и динамическая вязкость этилового спирта, 40%
при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$
0	947	50	916	0	7,14	50	1,13
10	941	60	910	10	4,39	60	0,89
20	935	80	897	20	2,91	80	0,6
30	929	100	885	30	2,02	100	0,44
40	923	120	872	40	1,48	120	0,34

Таблица 13

Плотности материалов частиц

Материал	Плотность, кг/м³	Материал	Плотность, кг/м³
Алюминий	2710	Пенопласт	125
Антрацит	1600	Пробка	240
Винипласт	1380	Ртуть	13546
Железо	7860	Свинец	11300
Зола	2200	Серебро	10500
Золото	19320	Сосна	500
Литье каменное	3000	Стекло	2500
Медь	8920	Титан	4500