

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Уфимский государственный авиационный технический университет**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА
КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ**

**Методические указания
к лабораторной работе № 123
по дисциплине «Физика»**

Уфа 2013

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Уфимский государственный авиационный технический университет

Кафедра физики

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА
КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ

Методические указания
к лабораторной работе № 123
по дисциплине «Физика»

Уфа 2013

Составитель В.С. Осипов

УДК 534.23(07)

ББК 22.36(Я7)

Методические указания к лабораторной работе № 123 по дисциплине «Физика» «Определение коэффициента вязкости воздуха капиллярным методом» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост. В.С. Осипов – Уфа, 2013. – 14 с.

В работе изучается одно из явлений переноса, называемое вязкостью или внутренним трением. Рассмотрена молекулярно-кинетическая теория этого явления, обусловленного тепловым движением молекул, и взаимосвязь кинематических характеристик этого движения с коэффициентом вязкости. Капиллярным методом экспериментально определяется коэффициент вязкости воздуха и находится средняя скорость теплового движения его молекул, их средняя длина свободного пробега и эффективный диаметр. Разобрана физическая основа метода, дана методика выполнения измерений и расчетов.

Предназначены для студентов, изучающих дисциплину «Физика» по разделу «Молекулярная физика и термодинамика», на всех реализуемых направлениях подготовки бакалавров и специалистов.

Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 2 назв.

Рецензенты: к. ф.-м. н., доц. Афанасьева А.М.,

к. ф.-м. н., доц. Якупов Э.З.

©Уфимский государственный
авиационный технический университет, 2013

Содержание

Введение	4
1. Цель работы.....	5
2. Задачи.....	5
3. Теоретическая часть	5
3.1. Тепловое движение молекул и внутреннее трение.....	5
3.2. Теория капиллярного метода измерения коэффициента вязкости.....	9
4. Экспериментальная установка.....	11
5. Требования по технике безопасности	12
6. Задания.....	12
7. Методика выполнения заданий	12
8. Контрольные вопросы	13
9. Требования к содержанию и оформлению отчета	13
10. Критерии результативности выполнения лабораторной работы ..	14
Список литературы	14

Лабораторная работа № 123

Определение коэффициента вязкости воздуха капиллярным методом

Введение

Всем газам и жидкостям присуще в той или иной степени оказывать сопротивление перемещению их частей друг относительно друга. Это их свойство называют внутренним трением или вязкостью. Вязкость является одним из явлений переноса, которые описываются одинаковыми по виду уравнениями, т.к. причина их возникновения одна – тепловое движение молекул.

В работе теоретически и экспериментально изучается внутреннее трение в газах и взаимосвязь динамической вязкости газа с микропараметрами теплового движения его молекул.

В результате выполнения данной лабораторной работы формируются следующие **компетенции**:

- способность демонстрировать базовые знания в области общенаучных дисциплин и готовность использовать основные законы в профессиональной деятельности;

- способность проводить эксперименты по заданной методике, обработку результатов, оценку погрешности и достоверности их результатов.

Перечисленные компетенции формируются через **умения**:

- работать с измерительными приборами;
- рассчитывать физические величины по экспериментальным данным;

- анализировать результаты опыта;

- оформлять отчет;

а также **владения**:

- теоретическим материалом;

- навыками измерения физических величин по приборам;

- технологией обработки экспериментальных данных.

1. Цели работы

1. Изучение вязкости как одного из явлений переноса.
2. Определение коэффициента вязкости воздуха и микропараметров теплового движения его молекул.

2. Задачи

1. Исследование внутреннего трения в газах.
2. Определение коэффициента вязкости воздуха капиллярным методом.
3. Расчет средней скорости теплового движения молекул воздуха, их средней длины свободного пробега и эффективного диаметра.

3. Теоретическая часть

3.1. Тепловое движение молекул и внутреннее трение

К явлениям переноса относятся процессы перехода системы в состояние термодинамического равновесия в результате переноса из одной ее части в другую либо частиц вещества (молекул, атомов, ионов, свободных электронов), либо тепловой энергии, либо импульса упорядоченного движения частиц. Первый из них называется диффузией, второй – теплопроводностью, а третий – внутренним трением или вязкостью. Все они обусловлены тепловым движением молекул и их столкновениями друг с другом. Столкновением называют такой процесс взаимодействия молекул, при котором они изменяют направление своего движения. Наименьшее расстояние, на которое сближаются центры масс молекул при столкновении, называют их эффективным диаметром, а среднее расстояние, проходимое молекулой между двумя следующими друг за другом столкновениями, – средней длиной свободного пробега молекулы.

Если газ или жидкость текут так, что их можно представить состоящими из несмешивающихся слоев, движущихся параллельно друг другу с различными скоростями, то течение называют ламинарным. Такое течение наблюдается при относительно малой его скорости. При больших скоростях течение становится турбулентным, динамические характеристики которого (скорость, давление, а для газов – плотность и температура) быстро и нерегулярно изменяются во времени, что приводит к интенсивному перемешиванию слоев.

При ламинарном течении на каждый из слоев со стороны соседних действуют силы, направленные по касательной к поверхности соприкосновения слоев и называемые силами внутреннего трения. На произвольно выбранный слой со стороны соседнего слоя, движущегося быстрее, действует ускоряющая его сила \vec{F}_y , а со стороны слоя, движущегося медленнее, – тормозящая \vec{F}_t . В результате скорость движения слоев друг относительно друга уменьшается. Все это объясняется беспорядочным тепловым движением молекул, благодаря которому они переходят из слоя в слой, перенося при этом свой импульс упорядоченного движения.

Экспериментально установлено, что сила внутреннего трения, возникающая между двумя соседними слоями газа при не очень больших их скоростях (по сравнению со средней скоростью теплового движения молекул), прямо пропорциональна площади соприкосновения слоев S и проекции вектора градиента модуля скорости движения слоев u на ось X . Ось X перпендикулярна направлению их движения, а вектор градиента направлен в сторону возрастания u . При этом сила внутреннего трения

$$F = \eta \left| \frac{du}{dx} \right| S. \quad (3.1)$$

Коэффициент η зависит от природы газа и его состояния. Его называют динамической вязкостью (часто просто вязкостью) или коэффициентом вязкости.

Рассмотрим внутреннее трение в идеальном газе, текущем в направлении, перпендикулярном оси X , полагая его состоящим из слоев, величина скорости которых зависит от координаты x , т.е. $u = u(x)$. Величина импульса, переносимого за время dt через поверхность площадью S , разделяющую два соседних слоя, движущихся со скоростями \vec{u}_1 и \vec{u}_2 ($u_1 > u_2$) (рис. 3.1), равна модулю разности импульсов, переносимых молекулами, пересекающими площадку с разных сторон. Если скорость упорядоченного движения молекул, равная скорости слоя, в котором они находятся, значительно меньше средней скорости $\langle v \rangle$ их беспорядочного теплового движения, то число dN молекул, пересекающих площадку за время dt как с одной, так и с другой стороны можно полагать одинаковыми и равными

$$dN = \frac{1}{6} n S \langle v \rangle dt, \quad (3.2)$$

где n – концентрация молекул. При массе молекулы m суммарный импульс упорядоченного движения, переносимый слева направо, равен $d\vec{K}_1 = m\vec{u}_1 dN$, а справа налево – $d\vec{K}_2 = m\vec{u}_2 dN$. В итоге в направлении уменьшения скорости течения газа переносится импульс величиной

$$|d\vec{K}| = |\vec{K}_1 - \vec{K}_2| = \frac{1}{6} n m S \langle v \rangle |\vec{u}_1 - \vec{u}_2| dt. \quad (3.3)$$

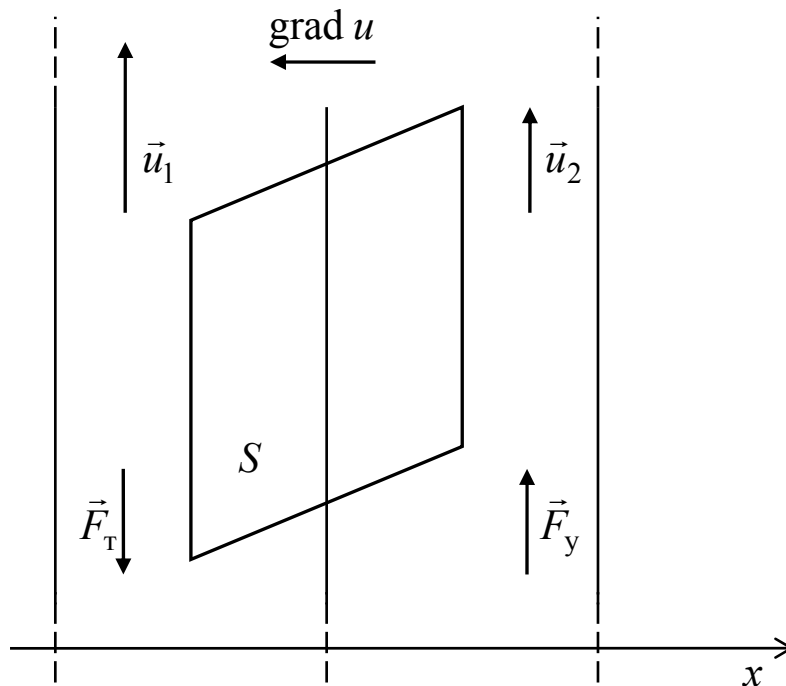


Рис. 3.1

Каждой молекулой переносится тот импульс, которым она обладает после последнего столкновения, т.е. находясь от границы раздела слоев на расстоянии в среднем равном длине свободного пробега молекулы λ . С достаточно большой точностью

$$|\vec{u}_1 - \vec{u}_2| = 2\lambda \left| \frac{du}{dx} \right|. \quad (3.4)$$

Используя уравнение Менделеева-Клайперона, выразим nm через параметры состояния газа

$$nm = \frac{MP}{RT}, \quad (3.5)$$

где M – молярная масса газа, P и T – его давление и абсолютная

температура, R – газовая постоянная, равная $8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

С учетом (3.4) и (3.5) уравнение (3.3) принимает вид

$$\left| d\vec{K} \right| = \frac{M P \lambda \langle v \rangle}{3RT} \left| \frac{du}{dx} \right| S dt . \quad (3.6)$$

В итоге приходим к выводу, что слои газа с площадью соприкосновения S действуют друг на друга с противоположно направленными силами \vec{F}_x и \vec{F}_y , величина которых F по второму закону Ньютона равна

$$F = \frac{\left| d\vec{K} \right|}{dt} = \frac{M P \lambda \langle v \rangle}{3RT} \left| \frac{du}{dx} \right| S . \quad (3.7)$$

Сравнивая (3.1) и (3.7), имеем

$$\eta = \frac{M P \lambda \langle v \rangle}{3RT} . \quad (3.8)$$

Знание коэффициента вязкости газа позволяет определить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр его молекул при данных температуре и давлении. Согласно закону Максвелла распределения молекул по скоростям их теплового движения

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} . \quad (3.9)$$

Подставляя (3.9) в (3.8), получаем

$$\lambda = \frac{3\eta}{2P} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M}} . \quad (3.10)$$

Эффективный диаметр молекул D , как следует из молекулярно-кинетической теории идеального газа, равен

$$D = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\pi P \lambda}} , \quad (3.11)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана.

3.2. Теория капиллярного метода измерения коэффициента вязкости

Рассмотрим несжимаемый газ, движущийся ламинарно внутри прямолинейной цилиндрической трубы с радиусом сечения r_c . С учетом симметрии из условия несжимаемости следует, что скорость течения газа в точках, расположенных на одинаковом расстоянии r от оси трубы, одна и та же вдоль всей трубы, но должна быть разной для различных r . Выделим в трубе часть газа, заключенного в цилиндре длиной l с некоторым радиусом оснований r , меньшим r_c (рис. 3.2).

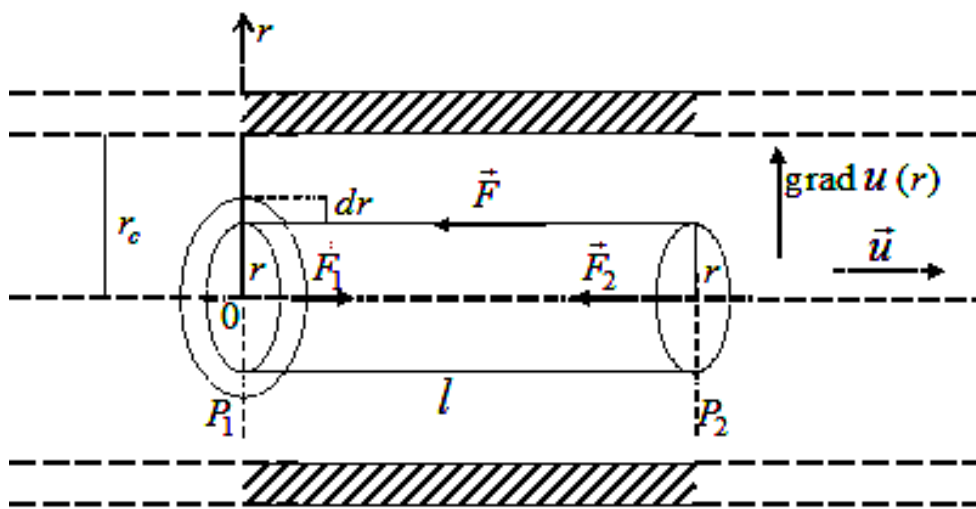


Рис. 3.2

При установившемся стационарном течении сумма сил давления \vec{F}_1 и \vec{F}_2 на газ в цилиндре и силы внутреннего трения \vec{F} равна нулю. Следовательно,

$$F = \pi r^2 \Delta P, \quad (3.12)$$

где ΔP – разность давлений газа P_1 и P_2 в тех сечениях трубы, в которых находятся основания выделенного цилиндра. Величина скорости течения газа уменьшается по мере увеличения r , т.е. $\frac{du}{dr} < 0$. В этом случае модуль силы внутреннего трения, действующей вдоль боковой поверхности цилиндра, площадь которой равна $2\pi r l$, согласно (3.1) равен

$$F = -\eta \frac{du}{dr} 2\pi r l. \quad (3.13)$$

Из (3.12) и (3.13) получаем дифференциальное уравнение

$$du = -\frac{\Delta P r dr}{2\eta l}, \quad (3.14)$$

интегрируя которое, имеем

$$u(r) = -\frac{\Delta P r^2}{4\eta l} + C, \quad (3.15)$$

где C – постоянная интегрирования.

Скорость слоя газа, непосредственно примыкающего к стенке трубы, при установившемся течении должна быть равной нулю в результате действия на него тормозящей силы трения со стороны только одного соседнего слоя. Если $u(r = r_c) = 0$, то

$$C = -\frac{\Delta P r_c^2}{4\eta l} \quad (3.16)$$

и

$$u(r) = -\frac{\Delta P (r_c^2 - r^2)}{4\eta l}. \quad (3.17)$$

Через кольцевую площадку с внутренним радиусом r и внешним $r + dr$, взятую в плоскости сечения трубы, за время t протекает объем газа $dV_t = 2\pi r u(r) t dr$, а через все сечение – объем

$$V_t = \int_0^{r_c} 2\pi r u(r) t dr = \int_0^{r_c} \frac{\pi r t \Delta P (r_c^2 - r^2) dr}{2\eta l} = \frac{\pi r_c^4 \Delta P t}{8\eta l}. \quad (3.18)$$

Объемный расход газа V (объем газа, протекающий через сечение за единицу времени) будет равен

$$V = \frac{\pi \Delta P r_c^4}{8\eta l}. \quad (3.19)$$

Полученную формулу (3.19) называют формулой Пуазейля. Ее можно использовать для экспериментального определения коэффициента вязкости газа (равно как и жидкости, поскольку все сказанное ранее справедливо и для нее). Для этого достаточно исследовать течение газа в достаточно длинной капиллярной трубке, у которой $l \gg r_c$, при перепаде давления на ее концах значительно меньшим давления покоящегося газа. Тогда с большой степенью точности газ можно считать несжимаемым, его течение ламинарным, а применение формулы Пуазейля правомерным.

4. Экспериментальная установка

Для измерения коэффициента вязкости воздуха предназначена установка ФПТ1-1, общий вид которой изображен на рис. 4.1.

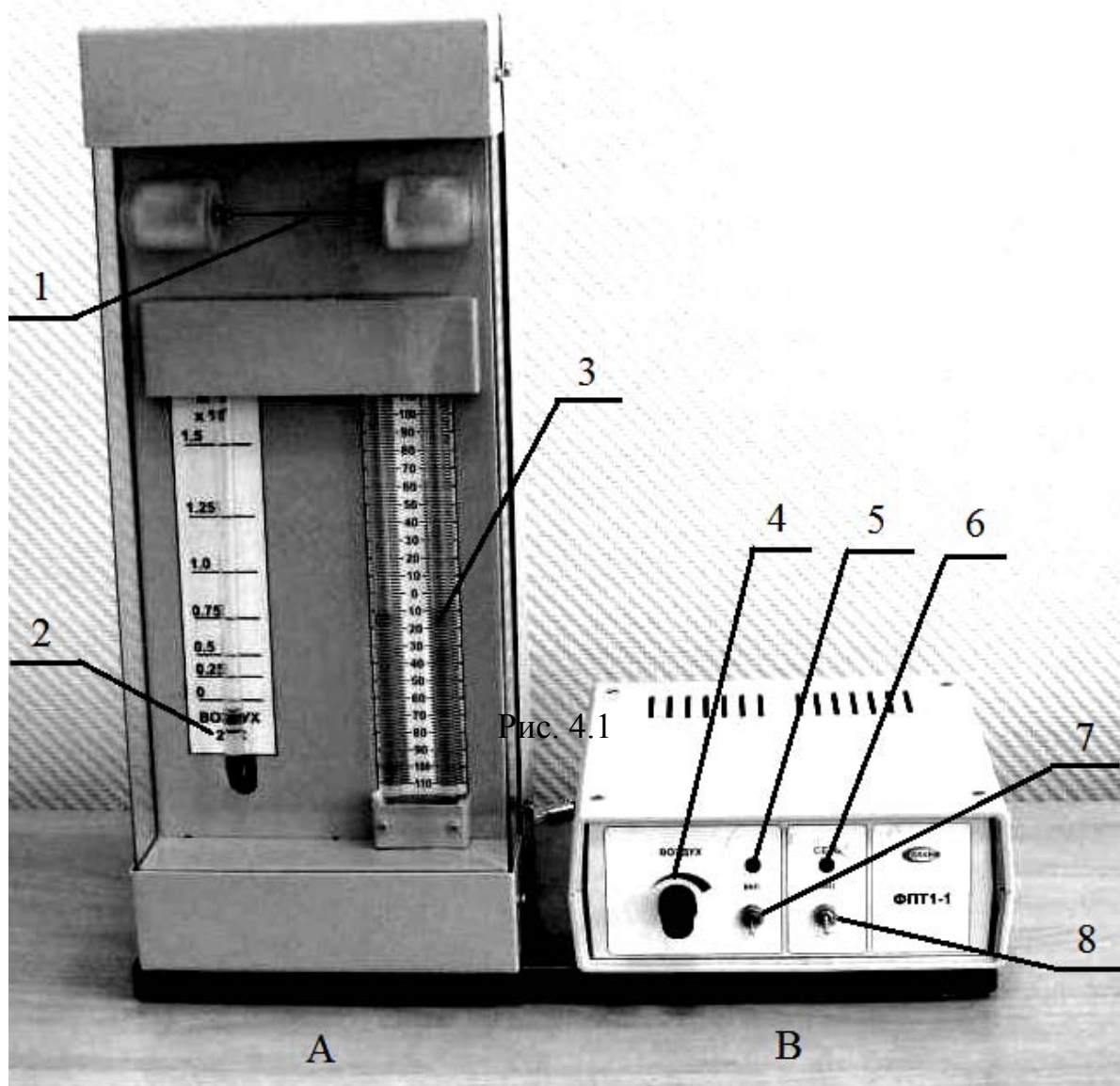


Рис. 4.1

Она состоит из двух отдельных функциональных блоков: измерительного блока А и блока управления В. В первом находится капиллярная трубка 1, через которую прокачивается воздух с помощью компрессора, размещенного в этом же блоке, реометр 2 для измерения объемного расхода воздуха и водяной манометр 3 для измерения разности давлений на концах трубки. На передней панели блока управления В расположены тумблеры 7, 8 и индикаторы 5, 6 включения компрессора и всей установки, а также регулятор объемного расхода воздуха 4.

5. Требования по технике безопасности

1. Нельзя перемещать основание установки с закрепленными на нем блоками по рабочему столу.
2. Запрещается оставлять без контроля работающий компрессор. Уровень воды в открытом колене манометра при прокачке воздуха не должен выходить за пределы шкалы водяного манометра.

6. Задания

1. При стационарном протекании воздуха через капиллярную трубку измерить перепад давления газа на ее концах и рассчитать коэффициент вязкости воздуха.
2. Измерить давление и температуру воздуха в лаборатории и вычислить среднюю скорость теплового движения его молекул, их среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр.

7. Методика выполнения заданий

1. Убедитесь в том, что регулятор объемного расхода воздуха находится в положении минимума. Если нет, то установите этот режим вращением регулятора влево до упора.
2. Включите установку тумблером «Сеть».
3. Включите компрессор тумблером 7 и с помощью регулятора «воздух» установите по шкале реометра 2 объемный расход воздуха $0,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$. Измерьте установившуюся разность уровней воды Δh в коленах манометра по шкале 3.
4. Изменяя режим работы компрессора, измерьте установившуюся разность воды в манометре для двух других значений объемного расхода воздуха, выбранных в интервале от $0,5 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ до $1,5 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$.
5. Установите регулятор расхода воздуха на минимум и выключите установку.
6. Для каждого режима работы компрессора вычислите коэффициент вязкости воздуха по формуле

$$\eta = \frac{\pi r_c^4 \rho g \Delta h}{8 l V}, \quad (7.1)$$

получаемой из формулы Пуазейля (3.19) подстановкой в нее

$$\Delta P = \rho g \Delta h, \quad (7.2)$$

где $\rho = 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность воды, $g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ – ускорение свободного падения. Необходимое для этого значения r_c и l указаны на верхней панели блока В установки.

7. По барометру и термометру в лаборатории измерьте давление и температуру воздуха в ней и по формулам (3.9), (3.10), (3.11) рассчитайте $\langle v \rangle$, λ и D (у воздуха $M = 29 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$), используя среднее значение коэффициента вязкости.

8. Оцените относительную ошибку измерения коэффициента вязкости.

8. Контрольные вопросы

1. Какие явления переноса Вы знаете? Перенос чего происходит в каждом из них?
2. В чем суть явления вязкости? Как оно объясняется?
3. Чем определяется сила внутреннего трения?
4. Что представляется собой градиент величины скорости течения газа? Какое у него направление?
5. От каких параметров состояния идеального газа зависит средняя скорость теплового движения его молекул?
6. Что называют средней длиной свободного пробега и эффективным диаметром молекулы?
7. Какое течение газа или жидкости называют ламинарным?
8. Изложите теорию капиллярного метода измерения коэффициента вязкости.
9. Каковы условия применимости формулы Пуазейля?
10. Почему при строительстве магистрального трубопровода предпочтение отдается увеличению диаметра труб, а не давления газа?

9. Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Номер, название и цель работы.
2. Краткую теорию метода измерения коэффициента вязкости воздуха и расчетные формулы.
3. Блок-схему установки с указанием геометрических размеров капилляра.

4. Данные измерений V , Δh , T и P , расчеты η , $\langle v \rangle$, λ и D , а также относительной ошибки $\delta\eta$, результаты которых представляются в табл. 1 и 2.

5. Выводы по результатам работы.

Таблица 1

№ п/п	$V, 10^5 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$	$\Delta h, \text{мм}$	$\eta, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\delta\eta, \%$
1				X
2				
3				
среднее				

Таблица 2

$T, \text{К}$	$P, \text{кПа}$	$\langle v \rangle, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\lambda, \text{мкм}$	$D, \text{нм}$

10. Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- овладел знаниями явлений переноса и их механизма, теоретических основ явления внутреннего трения и капиллярного метода измерения коэффициента вязкости, понятий ламинарного и турбулентного течений, средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул, а также условий применимости формулы Пуазейля.

- правильно выполнил измерения и расчёты;
- сформулировал выводы по результатам работы;
- составил отчет, соответствующий предъявляемым требованиям;
- дал полноценные ответы на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.1. – Спб.: Изд-во Лань, 2007.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Academia, 2008.

Составитель ОСИПОВ Валерий Сергеевич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА
КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ

Методические указания
к лабораторной работе № 123
по дисциплине «Физика»

Подписано в печать 2013. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Cyr.
Усл. печ. л. 1,1. Усл.-кр.-отт. 1,1. Уч-изд.л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ №
ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12