

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

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА  
И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ ЕГО МОЛЕКУЛ**

**Методические указания  
к лабораторной работе № 23  
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  
И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ ЕГО МОЛЕКУЛ

Методические указания  
к лабораторной работе № 23  
по дисциплине «Физика»

Уфа 2013

Составитель В.С. Осипов

УДК 533.2(07)

ББК 22.365(Я7)

Методические указания к лабораторной работе № 23 по дисциплине «Физика» «Определение коэффициента вязкости воздуха и кинематических характеристик теплового движения его молекул» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост. В.С. Осипов – Уфа, 2013. – 14 с.

В работе изучается явление внутреннего трения (вязкости) в газах. Рассматривается механизм явления, возникающего в результате теплового движения молекул, и зависимость силы внутреннего трения от микропараметров этого движения.

Разобрана теоретическая основа метода измерения коэффициента вязкости. Дана методика определения коэффициента вязкости воздуха, эффективного диаметра и средней длины свободного пробега его молекул.

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. Молекулярно-кинетическая теория вязкости газов.....	5
3.2. Теория метода измерения коэффициента вязкости газа и определение характеристик теплового движения его молекул....	8
4. Экспериментальная установка.....	10
5. Требования по технике безопасности .....	11
6. Задания.....	11
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 № 23

### Определение коэффициента вязкости воздуха и кинематических характеристик теплового движения его молекул

#### Введение

В любой неравновесной макросистеме возникают процессы, в результате которых она стремится перейти в состояние термодинамического равновесия. К таким процессам относятся явления переноса. Все они обусловлены тепловым движением микрочастиц, из которых состоит система, и поэтому подчиняются законам, выражаемым уравнениями одинакового вида.

В работе изучается одно из этих явлений – внутреннее трение, выясняется его механизм и взаимосвязь коэффициента вязкости с характеристиками теплового движения частиц.

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 явлений переноса в газах на примере внутреннего трения в воздухе.
2. Исследование внутреннего трения в газах и его зависимости от микропараметров теплового движения молекул.

## 2. Задачи

1. Закрепление знаний явлений переноса
2. Овладение капиллярным методом определения коэффициента внутреннего трения в газах и жидкостях и его экспериментальное определение для воздуха.
3. Приобретение навыков обработки данных измерений.
4. Расчет средней скорости теплового движения молекул воздуха при данных условиях, их средней длины свободного пробега и эффективного диаметра.

## 3. Теоретическая часть

### 3.1. Молекулярно-кинетическая теория вязкости газов

Явление вязкости или внутреннего трения, наблюдаемое в движущемся газе при его ламинарном течении, относится к явлением переноса, в данном случае – переноса импульса. Ламинарным называют такое течение газа, при котором его можно считать состоящим из отдельных несмешивающихся слоев, движущихся параллельно друг другу. Суть явления заключается в уменьшении скорости течения слоев друг относительно друга в результате беспорядочного теплового движения молекул газа и их столкновений. Столкновением называют процесс взаимодействия молекул, при котором они изменяют направление своего движения. Наименьшее расстояние, на которое сближаются центры масс молекул при столкновении, называют эффективным диаметром молекулы ( $D$ ), а среднее расстояние, проходимое молекулой от одного столкновения до следующего за ним, – ее средней длиной свободного пробега ( $\lambda$ ). Очевидно, что чем больше  $D$ , тем меньше  $\lambda$ , и наоборот.

Для идеального газа

$$D = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\pi\lambda P}}, \quad (3.1)$$

где  $T$  и  $P$  – абсолютная температура и давление газа,  $k = 1,38 \cdot 10^{23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$  – постоянная Больцмана.

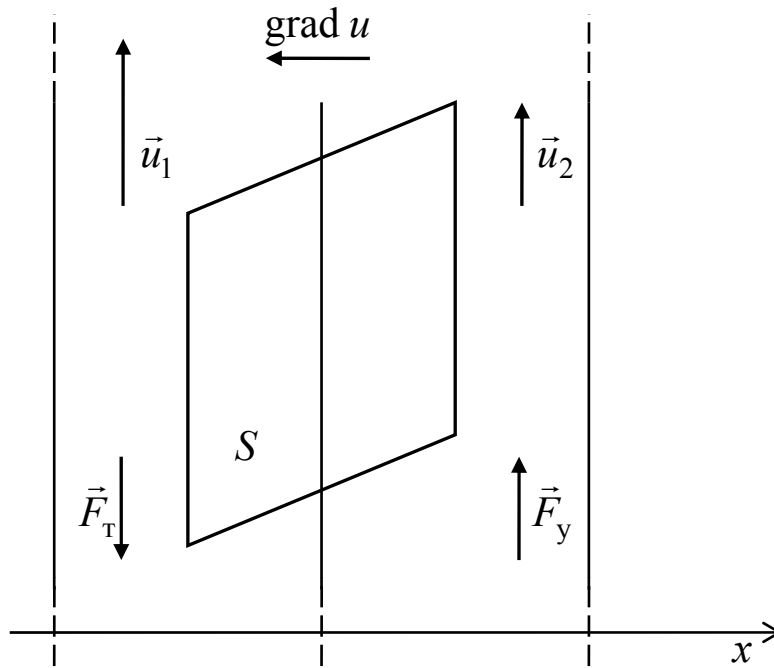


Рис. 3.1

Рассмотрим внутреннее трение в идеальном газе, текущем в направлении, перпендикулярном оси  $X$ , полагая его состоящим из слоев, скорость которых  $u$  зависит от координаты  $x$ , т.е.  $u = u(x)$ . Импульс, переносимый за время  $dt$  через поверхность, разделяющую два соседних слоя, движущихся со скоростями  $\vec{u}_1$  и  $\vec{u}_2$  ( $u_1 > u_2$ ) (рис. 3.1), равен разности импульсов, переносимых молекулами, пересекающими границу раздела слоев благодаря хаотичному тепловому движению молекул. Если средняя скорость  $\langle v \rangle$  этого движения значительно превышает скорость упорядоченного движения молекул, равную скорости слоя, в котором они находятся, то числа  $dN$  молекул, пересекающих поверхность с площадью  $S$  как с одной, так и с другой стороны, можно считать одинаковыми и равными

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

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

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

Каждой молекулой переносится тот импульс, который она имеет после последнего столкновения, т.е. находясь от границы раздела слоев на расстоянии в среднем равном ее длине свободного пробега. С большой степенью точности

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

где  $\frac{du}{dx}$  – проекция вектора градиента скорости течения  $u(x)$  на ось  $x$ , направленного в сторону ее возрастания.

Из уравнение состояния идеального газа имеем

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

где  $M$  – молярная масса газа,  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  – газовая постоянная.

С учетом (3.4) и (3.5) уравнение (3.3) приводится к виду

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

Следуя второму закону Ньютона, приходим к выводу, что на слой газа, движущийся медленнее соседнего слоя, со стороны последнего действует ускоряющая сила  $\vec{F}_y$ , а со стороны слоя с меньшей скоростью на слой с большей – тормозящая сила  $\vec{F}_T$ , величина которых равна

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

Опытным путем было установлено, что сила внутреннего трения, действующая вдоль поверхности соприкосновения слоев газа со скоростью течения, много меньше средней скорости теплового движения молекул, прямо пропорциональна  $S$  и  $\left| \frac{du}{dx} \right|$ , т.е.

$$F = \eta \left| \frac{du}{dx} \right| S. \quad (3.8)$$

Коэффициент пропорциональности  $\eta$  называют коэффициентом



вязкости или динамической вязкостью. Его значение зависит от природы газа и его состояния.

Сравнивая (3.7) и (3.8), получаем

$$\eta = \frac{M P \lambda \langle v \rangle}{3RT}. \quad (3.9)$$

### 3.2. Теория метода измерения коэффициента вязкости газа и определение характеристик теплового движения его молекул

Рассмотрим ламинарное течение газа внутри прямолинейной трубы с радиусом внутреннего сечения  $r_c$ . Из соображений симметрии при условии несжимаемости газа следует, что скорость его течения  $u$  в точках, расположенных на одном и том же расстоянии  $r$  от оси трубы, одинакова и зависит только от этого расстояния, т.е.  $u = u(r)$ . Выделим часть газа, заключенного в цилиндре длиной  $l$  с радиусом оснований  $r$ , меньшим  $r_c$  (рис. 3.2).

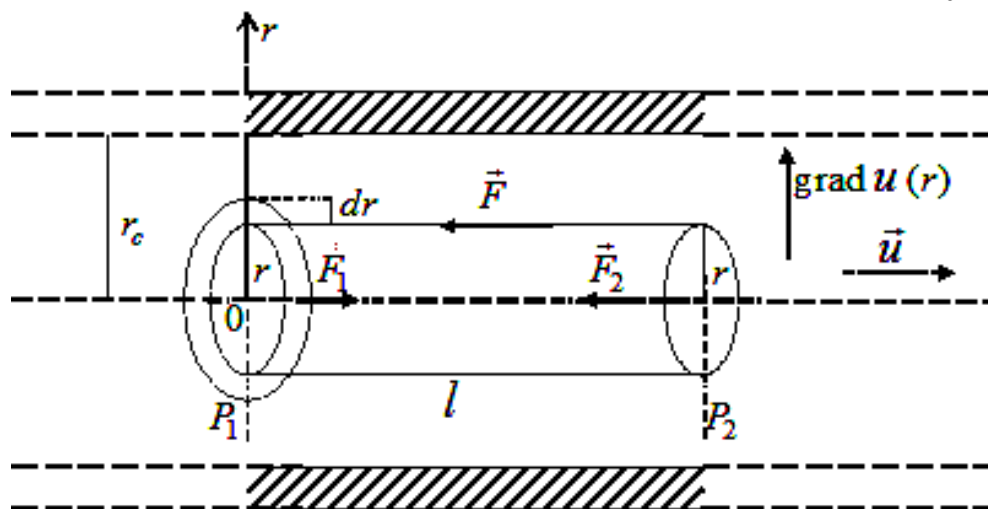


Рис. 3.2

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,

$$F = \pi r^2 \Delta P, \quad (3.10)$$

где  $\Delta P$  – 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  $2\pi rl$ , согласно (3.8), равен

$$F = -\eta \frac{du}{dr} 2\pi rl. \quad (3.11)$$

Из (3.10) и (3.11) получаем дифференциальное уравнение

$$du = -\frac{\Delta P r dr}{2\eta l}, \quad (3.12)$$

интегрируя которое, имеем

$$u(r) = -\frac{\Delta P r^2}{4\eta l} + C, \quad (3.13)$$

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, т.е.  $u(r = r_c) = 0$ . Поэтому

$$C = -\frac{\Delta P r_c^2}{4\eta l} \quad (3.14)$$

и

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

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

$$V_t = \int_0^{r_c} 2\pi r u(r) t dr = \int_0^{r_c} \frac{\pi r t \Delta P (r_c^2 - r^2) dr}{2\eta l} = \frac{\pi r_c^4 \Delta P t}{8\eta l}. \quad (3.16)$$

Объемный расход газа  $V$  (объем газа, протекающий через сечение за единицу времени) оказывается равным

$$V = \frac{\pi \Delta P r_c^4}{8\eta l}. \quad (3.17)$$

Формулу (3.17) 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.

Измерение коэффициента вязкости газа позволяет определить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр его молекул. По закону Максвелла для распределения молекул по скоростям их теплового движения

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}. \quad (3.18)$$

Подставляя (3.18) в (3.9), находим  $\lambda$

$$\lambda = \frac{3\eta}{2P} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M}}, \quad (3.19)$$

а затем по формуле (3.1) и  $D$

$$D = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\pi P \lambda}}. \quad (3.20)$$

#### 4. Экспериментальная установка

Измерение коэффициента вязкости воздуха в работе производится на установке, изображенной на рис. 4.1.

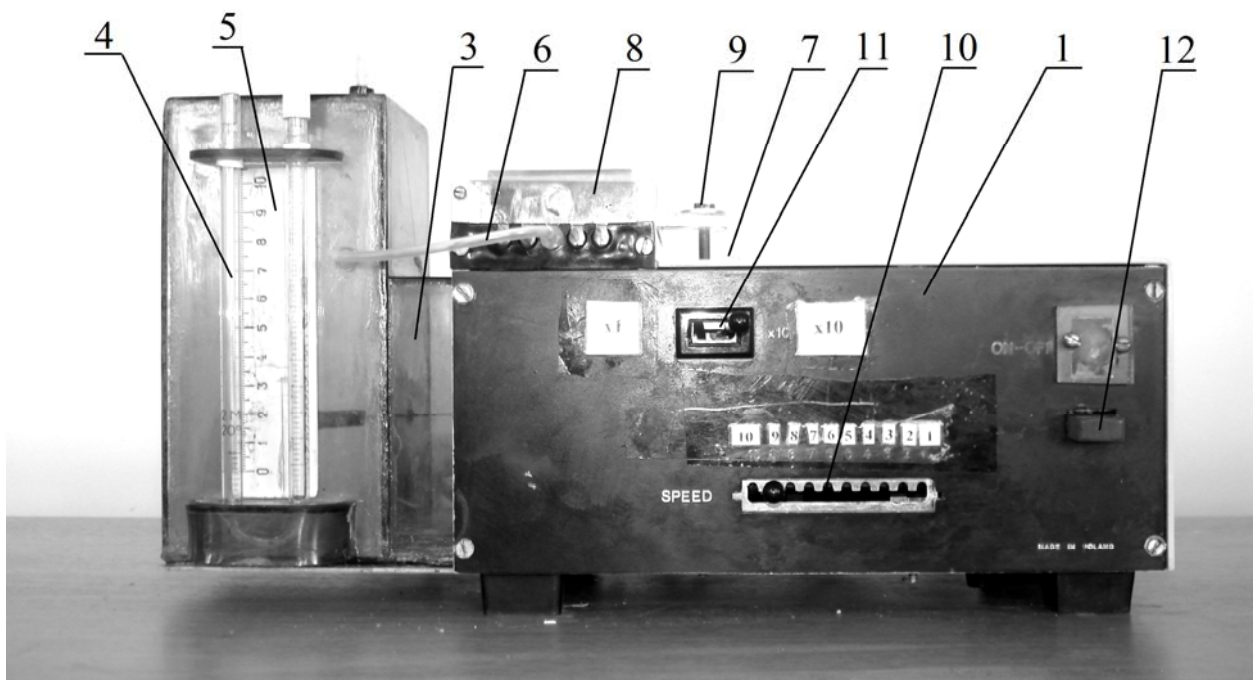


Рис. 4.1

Она состоит из перистальтического насоса 1 типа РР-I-05, герметичного сосуда 2, сообщающегося с атмосферой через капиллярную трубку 3, и водяного манометра 4 со шкалой 5. Одно из колен манометра сообщается с сосудом, другое – с атмосферой.

При включении насоса воздух из сосуда начинает откачиваться через соединительную трубку 6. Несмотря на то, что сосуд сообщается с атмосферой, давление в нем будет понижаться, так как в течение какого-то времени объем воздуха поступающего в сосуд через капиллярную трубку, будет меньше объема откачиваемого воздуха. Соответственно будет расти разность давлений  $\Delta P$  на концах капиллярной трубки, что, в свою очередь, приводит к увеличению объемного расхода воздуха, протекающего через капилляр в сосуд. При неизменной производительности насоса это будет происходить до тех пор, пока объем воздуха, поступающего в сосуд через капилляр за какое-то время, не станет равным объему воздуха, удаляемого насосом за то же время. С этого момента разность будет оставаться одной и той же и равной

$$\Delta P = \rho g \Delta h, \quad (4.1)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\Delta h = h_1 - h_2$  – разность высот  $h_1$  и  $h_2$  уровней воды в коленах манометра.

## 5. Требования по технике безопасности

1. Строго запрещается оставлять без контроля работающий насос. Необходимо следить за тем, чтобы вода в коленах манометра не выходила за пределы его вертикально стоящих трубок.

2. Установка переключений скорости откачки должна производиться плавно, без резких движений.

3. Не предпринимайте попыток изменить положение установки на рабочем столе.

## 6. Задания

1. При стационарном течении воздуха через капилляр измерить перепад давления газа на его 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 трубка 6, через которую откачивается воздух из сосуда, находится в одном из каналов насоса открытым концом в направлении стрелки 7, нанесенной на корпусе насоса, и накрыта крышкой 8, нажим и закрепление которой регулируется ручкой 9.

2. Установите переключатель скоростей откачки насоса 10 в положение с наименьшим из тех трех, которые укажет преподаватель, а переключатель множительного механизма 11 – в положение «x10». Установка переключателей производится плавным нажатием их вниз, последующим за этим перемещением в нужную сторону и дальнейшей фиксацией отжатием вверх.

3. Включите насос кнопкой 12 «Сеть» и измерьте установившуюся разность уровней воды  $\Delta h$  в коленях манометра.

4. Установите переключатель 10 в каждое из двух других положений в порядке возрастания их номеров и измерьте установившуюся разность высот уровней для этих положений.

5. В прилагаемом к установке паспорте найдите значения  $V$  объемного расхода воздуха, соответствующие тем положениям переключателя, при которых проводились измерения, а также геометрические параметры капиллярной трубки. Для каждой из них вычислите коэффициент вязкости воздуха по формуле

$$\eta = \frac{\pi r_c \rho g \Delta h}{8lV}, \quad (7.1)$$

получаемой из формулы Пуазейля (3.17) подстановкой в нее (4.1), а затем – среднее его значение. При вычислениях считать  $\rho = 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,

$$g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

6. По барометру и термометру в лаборатории измерьте давление и температуру воздуха в ней.

7. По формулам (3.18), (3.19), (3.1) рассчитайте среднюю скорость, среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул воздуха. Для него  $M = 29 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$ .

8. Оцените относительную погрешность определения коэффициента вязкости.

## 8. Контрольные вопросы

1. В чем суть явления вязкости? Как оно объясняется?
2. От чего зависит сила внутреннего трения?
3. Что такое градиент величины скорости течения газа?
4. От каких параметров зависит средняя скорость теплового движения молекул идеального газа?
5. Что называют средней длиной свободного пробега и эффективным диаметром молекулы?
6. Какое течение газа называют ламинарным?
7. Изложите теоретическую основу метода измерения коэффициента вязкости, применяемого в работе, и принцип работы экспериментальной установки.
8. При каких условиях применима формула Пуазейля?
9. Почему при увеличении объемного расхода газа в магистральных трубопроводах предпочтение отдается применению труб большего диаметра, а не увеличению перепада давления вдоль магистрали?

## 9. Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Номер, название и цель работы.
2. Основные положения теории явления внутреннего трения и метода измерения коэффициента вязкости.
3. Блок-схему установки.
4. Значения радиуса сечения и длины капиллярной трубки.
5. Данные измерений  $V$ ,  $\Delta h$ ,  $T$  и  $P$ , расчеты  $\eta$ ,  $\langle v \rangle$ ,  $\lambda$  и  $D$ , и относительной ошибки  $\delta\eta$  полученного значения коэффициента вязкости, результаты которых представляются в табл. 1 и 2.

Таблица 1

№ п/п	$V, 10^8 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$	$\Delta h, \text{мм}$	$\eta, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\delta\eta, \%$
1				X
2				
3				
среднее				

Таблица 2

$T, K$	$P, \text{кПа}$	$\langle v \rangle, \frac{M}{c}$	$\lambda, \text{мкм}$	$D, \text{нм}$

### 10. Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- усвоил понятия ламинарного течения, градиента скорости, средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул, а также условия применимости формулы Пуазейля;
- овладел знанием явления внутреннего трения, его механизма и теории метода измерения коэффициента вязкости;
- правильно выполнил измерения и расчеты;
- оформил отчет в соответствии с предъявляемыми требованиями;
- дал исчерпывающие ответы на контрольные вопросы.

### Список литературы

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.1. – Спб.: Изд-во Лань, 2007. – С. 269-274, 285-287.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Academia, 2008. – 1. С. 114-119.

Составитель ОСИПОВ Валерий Сергеевич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА  
И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ ЕГО МОЛЕКУЛ

Методические указания  
к лабораторной работе № 23  
по дисциплине «Физика»

Подписано в печать 2013. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Печать плоская. Гарнитура Nimes New Roman Cyr.

Усл. печ. л. 1,1. Усл.-кр.-отг. 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