

ФИЗИКАНЫҢ ӘДІСТЕМЕСІ МЕТОДИКА ФИЗИКИ

УДК 378.147:372.853

Методика изучения явлений переноса в вузовском курсе общей физики

Method of the transfer phenomena studying in the university general physics course

Ильина Л.Ф., Ещанова А.М.

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: l_191137@mail.ru)

Молекулярная физика орта мектеп физика курсына ерекше орын алса, жоғары оқу орындағы жалпы физика курсына да сондай орынға ие. Тасымалдау құбылыс молекулярлы-кинетикалық теория негізінің эксперименттік дәлелі де, эксперименттік расталуы да ретінде қызмет атқарады. Бұл — физиканың ең күрделі тарауының бірі. Мектеп курсына феноменді бөлігін қарастырса, жоғары оқу орында күрделі математикалық аппаратты қолдану арқылы зерттейді. Мақалада қойған сұрақ бойынша тек теория негіздері ғана келтірілмей, Е.А.Букетов атындағы Қарағанды мемлекеттік университетінің жалпы және теоретикалық физика кафедрасында өткізілген педагогикалық эксперименттің мазмұны туралы жазылған. Сондай-ақ классикалық және виртуал зерттеу жұмыстары, студент дайындығы бағалануының үш деңгейлі жүйесі қарастырылған. Жұмыс нәтижесі диаграмма арқылы рәсімделген.

Molecular Physics occupies a special position as a secondary school physics course and in the general physics course in college. Transport phenomena serve as experimental justification and experimental evidence of the foundations of molecular-kinetic theory. This is — one of the most difficult areas of physics. In the school course it is studied purely phenomenologically, and at university level — with a rather complex mathematical tool. The paper gives the basic theory of matter, as well as description of the pedagogical experiment on the subject, conducted by the Department of General and Theoretical Physics, KSU, named E.A.Buketov. It includes the tasks, classical and experimental laboratory works, and a three-level system of assessing the quality of students' training. The results are designed with the aid of diagrams.

Молекулярная физика занимает особое положение как в курсе физики средней школы, так и в курсе общей физики в вузе, так как объект, который она изучает, невидим. Поэтому судить о том, как ведут себя молекулы, мы можем только, используя анализ явлений, которые служат как экспериментальным обоснованием, так и экспериментальным подтверждением основ МКТ, и к ним прежде всего относятся явления переноса. В средней школе их рассмотрение носит чисто феноменологический характер: даются лишь определения самих явлений переноса — диффузии, вязкости, теплопроводности и приводятся несколько качественных примеров.

Например, если на хорошо очищенную поверхность золотой пластинки поставить свинцовый цилиндр с гладким основанием, то при постоянной комнатной температуре через несколько лет можно обнаружить, что они «спаялись». Химический анализ показывает, что небольшое количество золота проникает в свинец.

Явления переноса обусловлены хаотическим движением молекул. Поскольку все они имеют в основе общие физические закономерности (наличие градиента какой-либо величины и стремление системы к равновесному, однородному состоянию за счет теплового, хаотического движения молекул), то после рассмотрения явления диффузии (взаимное проникновение одного вещества между молекулами другого) очень просто получить так называемое обобщенное уравнение переноса, удобное для анализа конкретных процессов переноса.

Рассмотрим одномерное явление переноса [1].

Направим ось x вдоль градиента G (где G характеризует некоторое молекулярное свойство, отнесенное к одной молекуле). Среднее расстояние, пробегаемое молекулами, пересекающими площадку S после последнего столкновения, равно $2\langle\lambda\rangle/3$ (см. рис. 1).

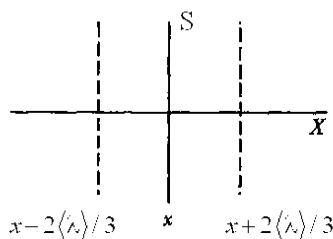


Рис. 1. К выводу стационарного уравнения переноса

Так как при нормальных условиях $\langle\lambda\rangle$ мало, то G на расстоянии $2\langle\lambda\rangle/3$ от площадки можно представить в виде

$$G\left(x \pm \frac{2}{3}\langle\lambda\rangle\right) = G(x) \pm \frac{2}{3}\langle\lambda\rangle \frac{\partial G(x)}{\partial x}. \quad (1)$$

Поток в направлении, *противоположном* оси x , равен

$$I_G^{(-)} = -\frac{1}{4}n \langle\vartheta\rangle \left[G(x) + \frac{\partial G}{\partial x} \cdot \frac{2}{3}\langle\lambda\rangle \right], \quad (2)$$

а по оси x имеем

$$I_G^{(+)} = +\frac{1}{4}n \langle\vartheta\rangle \left[G(x) - \frac{\partial G}{\partial x} \cdot \frac{2}{3}\langle\lambda\rangle \right]. \quad (3)$$

Следовательно, *полный поток* имеет вид

$$I_G = I_G^{(+)} + I_G^{(-)}, \quad (4)$$

или

$$I_G = -\frac{1}{3}n \langle\lambda\rangle \langle\vartheta\rangle \frac{\partial G}{\partial x}. \quad (5)$$

Уравнение (5) является стационарным уравнением переноса в общем виде.

Стационарным называется процесс, при котором параметры системы, участвующей в нем, с течением времени не изменяются.

Получим на основе уравнения (5) выражение для диффузии. Предположим, что молекулы равномерно заполняют некоторый объем и все они одинаковы по своим механическим и динамическим параметрам, однако могут отличаться по некоторому признаку, не оказывающему влияние ни на взаимодействие между молекулами, ни на их движение. Таким образом, переносимым признаком в этом случае является просто идентичность молекул. Назовем условно этот признак «цветом» и будем считать, что имеются «белые» и «черные» молекулы. Допустим, что концентрация «белых» и «черных» молекул в пространстве неоднородна. В состоянии равновесия оба сорта молекул должны равномерно заполнить весь объем. Поэтому при неоднородном распределении начнется выравнивание концентраций в результате столкновений между молекулами. Переносимым качеством в этом случае является концентрация рассматриваемого сорта молекул.

Учитывая, что G в уравнении (5) есть характеристика переносимого качества, отнесенная к одной молекуле, имеем:

$$G = \frac{n_1}{n},$$

где n_1 — концентрация первого сорта молекул, а n — концентрация смеси ($n = const$).

Тогда уравнение (5) принимает вид

$$I_{n,1} = -\frac{1}{3}n \langle\lambda\rangle \langle\vartheta\rangle \cdot \frac{1}{n} \frac{\partial n_1}{\partial x},$$

или, учитывая коэффициент диффузии, получаем:

$$I_{n,1} = -\frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle \cdot \frac{\partial n_1}{\partial x} = -D \frac{\partial n_1}{\partial x}. \quad (6)$$

Выражение (6) было получено экспериментально Фиком.

Если же имеется два сорта молекул, отличающихся как динамическими свойствами, так и характером взаимодействия, то процесс диффузии значительно усложняется.

Тогда поток первой компоненты I_1 , являющийся суммой ее диффузионного и гидродинамического потоков, равен

$$I_1 = I_{n,1} + n_1 u = -\frac{D_1 n_2 + D_2 n_1}{n_1 + n_2} \frac{\partial n_1}{\partial x} = -D_{1,2} \frac{\partial n_1}{\partial x},$$

где

$$D_{1,2} = (D_1 n_2 + D_2 n_1) / (n_1 + n_2),$$

а u — скорость переноса смеси.

Аналогично для полного потока второй компоненты находим:

$$I_2 = I_{n,2} + n_2 u = -D_{2,1} \frac{\partial n_2}{\partial x},$$

где

$$D_{2,1} = (D_2 n_1 + D_1 n_2) / (n_2 + n_1).$$

$D_{1,2} = D_{2,1}$ — коэффициенты взаимной диффузии, определяемые кинематическими характеристиками каждой компоненты.

Вязкость, или внутреннее трение в газах, обуславливается переносом импульса молекул поперек направления движения слоев газа, имеющих различные скорости.

В результате теплового движения молекулы перелетают из одного слоя газа в другой, перенося при этом свой импульс $m_0 u$ упорядоченного движения. Поток импульса упорядоченного движения в перпендикулярном скорости направлении в данном случае равен

$$G = m_0 u,$$

и, следовательно, уравнение (5) принимает вид

$$I_{m_0 u} = -\frac{1}{3} n \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle m_0 \frac{\partial u}{\partial x},$$

или, учитывая коэффициент вязкости, имеем:

$$I_{m_0 u} = -\frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle \frac{\partial u}{\partial x} = -\eta \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (7)$$

При рассмотрении явления *теплопроводности* G есть средняя энергия теплового движения молекулы. Из теоремы о равномерном распределении энергии по степеням свободы

$$G = \frac{i}{2} k T,$$

плотность потока тепла

$$I_Q = -\frac{1}{3} n \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle \frac{i}{2} k \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (8)$$

Введем удельную теплоемкость c_v , учитывая, что

$$(i/2) k n = c_v \rho,$$

тогда

$$I_Q = -\frac{1}{3} \rho c_v \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (9)$$

а для потока тепла имеем:

$$I_Q = -\chi \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (10)$$

Все указанные выше явления стационарны, но реально они нестационарны, т.е. зависят от времени, что приводит к необходимости решать нестационарные задачи, учитывающие зависимость величины G как от координат, так и от времени. Однако этот анализ выходит за рамки данной статьи.

Предлагаемый материал отработан в процессе чтения вузовского курса молекулярной физики профессором Л.Ф.Ильиной в течение многих лет.

Все задачи на явления переноса — *повышенной сложности*.

Вот некоторые из них.

Задача 1 [2]. Два одинаковых параллельных диска, оси которых совпадают, расположены на расстоянии h друг от друга. Радиус каждого диска равен a , причем $a \gg h$. Один диск вращают с небольшой угловой скоростью ω , другой диск неподвижен. Найти момент сил трения, действующий на неподвижный диск, если вязкость газа между дисками равна η .

Задача 2 [2]. Решить предыдущую задачу, считая, что между дисками находится ультраразреженный газ с молярной массой M , температурой T и под давлением p .

Задача 3 [2]. Пространство между двумя большими горизонтальными пластинами заполнено гелием. Расстояние между пластинами $l = 50$ мм. Нижняя пластина поддерживается при температуре $T_1 = 290$ К, а верхняя — при $T_2 = 330$ К. Давление газа близко к нормальному. Найти плотность потока тепла.

Задача 4 [2]. Гелий под давлением $p = 1,0$ Па находится между двумя большими параллельными пластинами, отстоящими друг от друга на $l = 5,0$ мм. Нижняя пластина поддерживается при температуре $t_1 = 17$ °С, другая — при $t_2 = 37$ °С. Найти среднюю длину свободного пробега атомов гелия и плотность потока тепла.

Задача 5 [3]. Определить толщину льда, образующегося в течение заданного времени t на спокойной поверхности озера. Считать, что температура T окружающего воздуха все время постоянна и равна температуре наружной поверхности льда ($T < T_{nl}$, где T_{nl} — температура плавления льда). Про-

извести численный расчет, предполагая, что $t = -10$ °С. Для льда $\chi = 2,2 \frac{Вт}{м \times К}$, $\lambda = 3,4 \times 10^5 \frac{Дж}{кг}$,

$$\rho = 10^3 \frac{кг}{м^3}.$$

Последняя задача наиболее интересна.

Решение задачи. Пусть к моменту времени t слой воды толщиной z замерз (см. рис. 2). Замерзает слой толщиной dz , при этом выделяется тепло, которое отводится наружу за счет теплопроводности льда толщиной z .

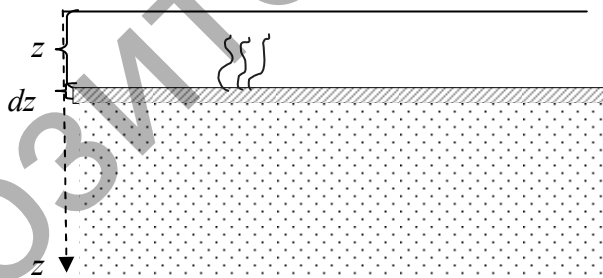


Рис. 2. К определению толщины льда в спокойном озере

По уравнению теплового баланса

$$-\lambda \rho S dz = -\chi \frac{T_{nl} - T_0}{z} S dt,$$

отсюда

$$\lambda \rho S dz = \chi \frac{T_{nl} - T_0}{z} S dt.$$

Разделяем переменные

$$z dz = \frac{\chi (T_{nl} - T_0)}{\lambda \rho} dt,$$

интегрируем

$$z = \sqrt{\frac{2\chi(T_{n1} - T_0)}{\lambda\rho} t},$$

считаем

$$z = \sqrt{\frac{2 \times 2,2 \times 10 \times 2,4 \times 3,6 \times 10^6}{3,4 \times 10^5 \times 10^3}} \cong 0,11 \text{ м} \cong 11 \text{ см}.$$

Таким образом, за одни сутки толщина льда составит 11 см.

Сравнительному анализу методик изучения явлений переноса с использованием интерактивных технологий посвящена дипломная работа А.М.Ещановой.

«Проверку» большинства физических законов с качественной стороны, а также измерение некоторых физических постоянных можно осуществить только на лабораторных занятиях, которые действуют более глубокому усвоению изучаемого материала. Кроме классических лабораторных работ, представляющих собой проведение реального эксперимента (возможно, демонстрационного), существуют и виртуальные, смоделированные на компьютере. Они расширяют круг опытов, так как позволяют изучать процессы при экстремальных значениях физических параметров и рассматривать в виде демонстрационных работ мысленные эксперименты, исторические опыты и т.д. [4].

Мы предлагаем 3 классические лабораторные работы и 2 виртуальные.

Классические:

1. Определение коэффициента вязкости газа и средней длины свободного пробега молекул воздуха.
2. Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса.
3. Определение коэффициента теплопроводности воздуха методом нагретой нити.

Виртуальные [5, 6]:

1. Изучение движения тел при наличии сил вязкого трения.
2. Определение длины свободного пробега.

Для осуществления «плавного» перехода от лекционных, практических и лабораторных занятий к планомерной организации СРС предлагаем 3-уровневое изучение темы в вопросах и ответах.

1-й уровень (самый простой) — в нем предлагаются традиционные тестовые вопросы.

Пример

Укажите правильную формулу для коэффициента вязкости.

- А) $\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$. В) $\eta = -\frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$. Д) $\eta = -\frac{1}{3} \rho c_v \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.
- Б) $\eta = -\frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$. Г) $\eta = \frac{1}{3} \rho c_v \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.

2-й уровень (промежуточный) — для рассмотрения на занятиях по СРСП, т.е. в аудитории.

Пример

Укажите правильные формулы, относящиеся к вязкости в газах:

1. $dK = -\eta \frac{du}{dx} dS$;
2. $df = -\eta \frac{du}{dx} dt$;
3. $dK = \eta \frac{du}{dx} dSdt$;
4. $df = -\eta \frac{du}{dx}$;
5. $dK = -\eta \frac{du}{dx} dt$;
6. $\eta = -\frac{1}{3} \lambda \vartheta \rho$;
7. $dK = -\eta \frac{du}{dx} dSdt$;
8. $\eta = \lambda \vartheta \rho$;
9. $df = -\eta \frac{du}{dx} dSdt$;
10. $\eta = \frac{1}{3} \lambda \rho$;
11. $df = \eta \frac{du}{dx} dS$;
12. $\eta = -\frac{1}{3} \vartheta \rho$.

3-й уровень (повышенной сложности) — предназначен для работы студентов во внеурочное время, но с обязательным анализом на занятиях СРСП.

Пример

Сконструируйте правильное утверждение о зависимости коэффициентов переноса от давления в нормальной области при постоянной температуре.

1. Коэффициент диффузии ...
2. Коэффициент вязкости ...

3. Коэффициент теплопроводности ...
4. ...прямо пропорционален давлению.
5. ...обратно пропорционален давлению.
6. ...не зависит от давления.

Был проведен педагогический эксперимент. Для проверки уровня усвоения материала по теме студентам групп ФОР-101, РТР-113, ТЭР-111, ФПР-107 предлагались следующие виды контроля: тестирование (1 вариант — 15 вопросов) с пятью вариантами ответов в каждом, физический диктант (один вариант).

Содержание физического диктанта:

1. Определение явлений переноса.
2. Каково значение явлений переноса в молекулярной физике?
3. Какие явления переноса вы знаете?
4. Что такое средняя длина свободного пробега (определение, формула)?
5. Среднее число соударений молекул с другими молекулами в единицу времени (формула).
6. Что такое эффективный диаметр молекулы?
7. Что такое диффузия? Закон Фика. Коэффициент диффузии.
8. Что такое вязкость? Закон Ньютона. Коэффициент вязкости.
9. Что такое теплопроводность? Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности.
10. Какие явления переноса называются стационарными?
11. Почему реальные явления переноса являются нестационарными?

Вопросы для тестирования

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Какие явления относятся к явлениям переноса? 1. Диффузия. 2. Вязкость. 3. Теплопроводность. 4. Броуновское движение. 5. Столкновения между молекулами. А) 1,2,3. Б) Только 1,2. В) 1,2,3,4. Г) 4,5. Д) Все ответы верны. | <ol style="list-style-type: none"> 4. По какой формуле определяется эффективное сечение молекулы? А) $\sigma_{эф} = \pi d^2$. Б) $\sigma_{эф} = \sqrt{2} \pi d^2$. В) $\sigma_{эф} = \pi d$. Г) $\sigma_{эф} = \langle v \rangle \pi d^2$. Д) $\sigma_{эф} = \langle z \rangle \pi d^2$. |
| <ol style="list-style-type: none"> 2. Какие вещества имеют большую теплопроводность? А) Пух, мех, шерсть. Б) Металлы. В) Разреженный газ. Г) Жидкости. Д) Стекло, фарфор. | <ol style="list-style-type: none"> 5. Средняя длина свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ — это... А) расстояние, которое пролетает молекула от первого столкновения до последнего; Б) среднее расстояние, которое пролетает молекула от одного столкновения до следующего; В) среднее число столкновений в единицу времени; Г) среднее число столкновений в единице объема. Д) Нет правильного ответа. |
| <ol style="list-style-type: none"> 3. Эффективным диаметром молекулы называется... А) максимальное расстояние, на которое молекулы могут подойти друг к другу; Б) минимальное расстояние, на которое молекулы могут подойти друг к другу; В) среднее расстояние между центрами молекул; Г) расстояние между центрами молекул; Д) диаметр самой молекулы. | <ol style="list-style-type: none"> 6. Укажите правильную формулу для средней длины свободного пробега молекул. А) $\langle \lambda \rangle = \langle \vartheta \rangle \langle z \rangle$. Б) $\langle \lambda \rangle = \sqrt{2} \langle \vartheta \rangle \langle z \rangle$. В) $\langle \lambda \rangle = \sqrt{2} \pi d_{эф} / \langle \vartheta \rangle$. Г) $\langle \lambda \rangle = \sqrt{2} \pi d_{эф}$. Д) $\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d_{эф}^2 n}$. |

7. Какое утверждение является неверным в состоянии физического вакуума?

- А) Вязкость невозможна.
 Б) Невозможна теплопроводность.
 В) Явления переноса идут так же, как и при нормальных условиях.
 Г) Диффузия осуществляется со скоростью движения молекул.
 Д) Возможен перенос тепла между стенками сосуда.

8. Укажите правильную формулу для коэффициента диффузии.

- А) $D = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.
 Б) $D = -\frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.
 В) $D = \frac{1}{3} \rho c_v \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.
 Г) $D = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.
 Д) $I_G = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle \frac{\partial G}{\partial x}$.

9. Укажите правильную формулу для коэффициента вязкости.

- А) $\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.
 Б) $\eta = -\frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.
 В) $\eta = -\frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.
 Г) $\eta = \frac{1}{3} \rho c_v \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.
 Д) $\eta = -\frac{1}{3} \rho c_v \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.

10. Укажите правильную формулу для коэффициента теплопроводности.

- А) $\chi = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.
 Б) $\chi = -\frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.
 В) $\chi = \frac{1}{3} \rho c_v \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.
 Г) $\chi = -\frac{1}{3} \rho c_v \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.
 Д) $\chi = \frac{1}{3} c_v \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle$.

11. Явления переноса называются стационарными, если...

- А) параметры системы, участвующей в процессе, с течением времени не изменяются;
 Б) параметры системы, участвующей в процессе, с течением времени изменяются;
 В) параметры системы, участвующей в процессе, с течением времени меняются дискретно;
 Г) система, участвующая в процессе, неподвижна;
 Д) нет правильного ответа.

12. Выбрать формулу, соответствующую стационарному уравнению переноса в общем виде.

- А) $I_G = -\frac{1}{3} n \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle \frac{\partial G}{\partial x}$.
 Б) $I_G = \frac{1}{3} n \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle \frac{\partial G}{\partial x}$.
 В) $I_G = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle \frac{\partial G}{\partial x}$.
 Г) $I_G = -\frac{1}{6} n \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle \frac{\partial G}{\partial x}$.
 Д) $I_G = \frac{1}{6} n \langle \lambda \rangle \langle \vartheta \rangle \frac{\partial G}{\partial x}$.

13. Укажите формулу, соответствующую закону Фика.

- А) $\Delta m = -D \frac{\Delta \rho}{\Delta x} \Delta S \Delta t$.
 Б) $\Delta m = -\eta \frac{\Delta u}{\Delta x} \Delta S \Delta t$.
 В) $\Delta m = -\chi \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta S \Delta t$.
 Г) $\Delta m_0 = D \frac{\Delta \rho}{\Delta x}$.
 Д) $\Delta m_0 = -\chi \frac{\Delta T}{\Delta x}$.

14. Укажите формулу, соответствующую закону Ньютона.

- А) $\Delta K = -\eta \frac{\Delta u}{\Delta x} \Delta S \Delta t$.
 Б) $\Delta K = \eta \frac{\Delta u}{\Delta x} \Delta S \Delta t$.
 В) $\Delta K = \eta \frac{\Delta u}{\Delta x} \Delta S$.
 Г) $\Delta K_0 = -\eta \frac{\Delta u}{\Delta x} \Delta S$.
 Д) $\Delta K_0 = -\frac{\Delta u}{\Delta x} \Delta S \Delta t$.

15. Укажите формулу, соответствующую закону Фурье.

А) $\Delta Q = \chi \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta S \Delta t$.

Б) $\Delta Q = -\chi \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta S \Delta t$.

В) $\Delta Q_0 = -\chi \frac{\Delta T}{\Delta x}$.

Г) $\Delta Q_0 = \chi \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta S$.

Д) $\Delta Q_0 = -\chi \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta S$.

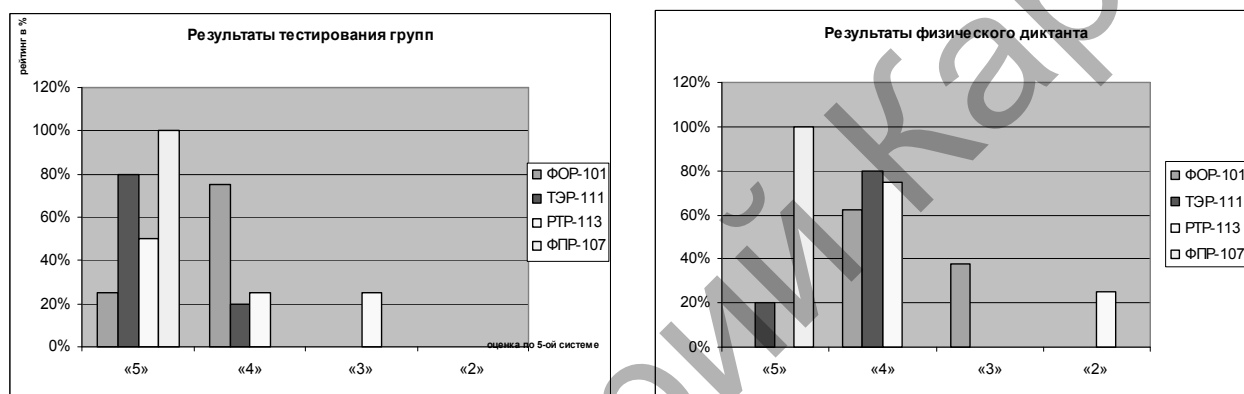


Рис. 3. Результаты педагогического эксперимента

Из диаграмм видно, что результаты тестирования во всех группах лучше, чем результаты диктантов (рис. 3). Это можно объяснить тем, что в тестировании предлагались варианты ответов, из которых нужно было выбрать только один. Студенты, работая с тестами, чувствовали себя более раскованно, так как эта система им более привычна. Тестирование было проведено после написания диктанта, поэтому ребята частично повторили материал.

Диктант писать сложнее, чем работать с тестами, так как он является экспресс-контролем, предполагающим восприятие «на слух», что менее продуктивно, нежели визуальное восприятие.

В заключение отметим, что представленный в статье материал труден для восприятия как студентами, так и школьниками, поэтому необходимо тщательно отрабатывать теорию вопроса, подбирать задачи, экспериментальное обеспечение.

Широкое использование интерактивных технологий способствует эффективности усвоения материала.

References

1. *Matveev A.N.* Molecular physics: Practice textbook for University. — М.: Higher school, 1981. — 400 p.
2. *Irodov I.E.* Tasks of general physics. — М.: Nauka, 1988. — 416 p.
3. *Ginsburg V.L., Levin L.M., Sivuhin D.V., Yakovlev I.A.* Collection tasks of general physics course. Thermodynamics and molecular physics. — М.: Nauka, 1976. — 207 p.
4. *Tolstic A.M.* Virtual physics laboratory. — Tomsk: Tomsk State University, 2007. — 272 p.
5. *Tolstic A.M.* Program virtual physics laboratory. — Tomsk: Tomsk State University, 2007. — 272 p.
6. *Kosov N.D., Kosov M.D.* Molecular physics in questions and answers. — Almaty, 1999. — 142 p.