

Изучение распределения Максвелла с помощью компьютерной модели и в натурном эксперименте

Проанализированы методические возможности и примеры практической реализации использования метода пространственного разделения частиц, имеющих разные скорости, за счет влияния силы тяжести на дальности их полета при изучении распределения Максвелла в курсе общей физики. Показана методическая необходимость сочетания натурального эксперимента с исследованием соответствующей физической модели на компьютере при использовании этого метода в лабораторной практике.

Ключевые слова: *распределение Максвелла, физическая модель, натурный эксперимент, компьютерная лабораторная работа, методика преподавания.*

STUDYING OF MAXWELL DISTRIBUTION BY MEANS OF COMPUTER MODEL AND IN NATURAL EXPERIMENT

We analyze methodical opportunities and examples of practical realization of use of a method of spatial separation of the particles having different speeds, at the expense of influence of gravity on ranges of their flight in the study of the Maxwell distribution in a course of the general physics. The article demonstrates methodical need of a combination of natural experiment with research of the corresponding physical model on the computer by using this method in laboratory a practical work.

Keywords: *Maxwell's distribution, physical model, natural experiment, computer laboratory work, teaching technique.*

Введение

В процессе становления молекулярно-кинетической теории газов на рубеже XIX–XX вв. физиками был предложен ряд опытов, подтверждающих справедливость распределения Максвелла. Принципы постановки этих опытов, учитывая их фундаментальный характер, описываются как в школьных учебниках физики [1], так и более детально – в вузовском курсе общей физики [2]. Наиболее часто в учебной и методической литературе по преподаванию физики описывается опыт О. Штерна (1920 г.), в котором пространственное разделение атомов серебра по скоростям происходило за счет вращения с разной угловой скоростью двух имеющих общую ось цилиндров, так что внутренний цилиндр выступал в роли источника, а внешний – в роли приемника частиц серебра. С методической точки зрения

этот опыт, как и ряд других, описание которых встречается в учебниках физики реже, имеет большое значение для доказательства справедливости теории Максвелла о распределении молекул газа по скоростям. Однако знакомство студентов и школьников с этими фундаментальными опытами происходит на описательном уровне. Это связано с рядом материальных трудностей: учебные заведения не обладают необходимым техническим и финансовым потенциалом для проведения подобных опытов даже в демонстрационном варианте. Кроме того научные опыты, обладая высокой доказательностью, имеют, как правило, низкую наглядность – различное движение частиц, обладающих разными скоростями, внутри прибора не доступно для непосредственного наблюдения. В то время как именно эти различия и несут наибольшую методическую нагрузку в изучении распределения

Максвелла по скоростям. Поэтому наряду с известными историческими опытами в учебной литературе часто описывается механическая модель, позволяющая визуализировать распределение Максвелла [1, 3].

Несмотря на внешнюю простоту и наглядность механической модели, ее техническая реализация долгое время отсутствовала не только в лабораторном практикуме школ, но и вузов. Разработанное фирмой RHYWE Systeme GmbH & Co лабораторное оборудование для практикума по физике включает техническую реализацию известной механической модели и позволяет перейти к экспериментальному изучению распределения Максвелла в курсе общей физики. Для анализа эффективности использования данной установки в учебном процессе необходимо кратко остановиться на методе пространственного разделения частиц газа, имеющих разные



Надежда Степановна Кравченко,
к.ф.-м.н., доцент кафедры
теоретической
и экспериментальной физики
Тел.: (3822) 417-028
Эл. почта: KravchenkoNS@tpu.ru
Национальный исследовательский
Томский политехнический
университет
www.tpu.ru

Nadegda S. Kravchenko,
Candidate of Physical
and mathematical Science,
Docent of Theoretical and Experimental
Physics Department
Tel.: (3822) 417-028
E-mail: KravchenkoNS@tpu.ru
National Research Tomsk Polytechnic
University
www.tpu.ru

скорости, за счет влияния силы тяжести на дальность их полета, используемом в данной механической модели.

1. Метод пространственного разделения частиц, имеющих разные скорости, в поле силы тяжести (метод ПРЧПСТ)

В приближении молекулярно-кинетической теории молекулы идеального газа являются тождественными и движутся хаотически. Поэтому непосредственное фиксирование их траекторий и скоростей в сосуде, где установилось термодинамическое равновесие, невозможно. Основная идея всех опытов по изучению распределения Максвелла состоит в создании условий, при которых покинувшие сосуд частицы газа, имеющие разные скорости, будут двигаться по разным траекториям. Это позволит в разных областях пространства фиксировать частицы, обладавшие в сосуде различными скоростями.

Один из методов такого пространственного разделения основан на влиянии силы тяжести на дальность полета вылетевших из сосуда частиц. Если движение частиц в поле силы тяжести считать равноускоренным, то в общем случае дальность полета x частицы, влетевшей в поле силы тяжести под углом α к горизонту на высоте h , зависит от ее начальной скорости v :

$$gx^2 - v^2 \sin 2\alpha x = 2hv^2 \cos^2 \alpha$$

или

$$x = \frac{v^2}{g} \cos \alpha \left(\sin \alpha + \sqrt{\sin^2 \alpha + \frac{2gh}{v^2}} \right).$$

Чем больше начальная скорость v движения частицы в поле силы тяжести, тем больше ее дальность полета x . Эта зависимость позволяет по дальности полета частиц, вылетевших из сосуда под определенным углом к горизонту, рассчитать их скорости в сосуде:

$$v = \sqrt{\frac{gx^2}{h + h \cos 2\alpha + x \sin 2\alpha}}.$$

Для этого горизонтальную поверхность вблизи отверстия в сосуде, в котором частицы движутся хаотически, разбивают на участки

равной длины. Чтобы частица, вылетев из сосуда, попала на участок $[x_{i-1}, x_i]$, необходимо, чтобы в сосуде она обладала скоростью $v \in [v_{i-1}, v_i]$. Тогда, зная количество частиц ΔN_i , попавших на участок $[x_{i-1}, x_i]$, можно рассчитать значение функции распределения $F(v_{i-1}) \approx \frac{\Delta N_i}{N \Delta v_i}$ (N – общее количество частиц, вылетевших из сосуда, $\Delta v_i = v_i - v_{i-1}$) и сравнить его с распределением Максвелла

$$F(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \cdot \exp \left(-\frac{mv^2}{2kT} \right)$$

или

$$F(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{v^2}{v_g^3} \cdot \exp \left(-\frac{v^2}{v_g^2} \right),$$

где m – масса частицы; T – температура газа; $v_g = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$ – наивероятнейшая скорость, соответствующая максимуму функции распределения. Согласно молекулярно-кинетической теории температура газа связана со средней кинетической энергией $\langle \varepsilon \rangle$ движения молекул и их среднеквадратичной скоростью

$$v_{кв}: \langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT = \frac{mv_{кв}^2}{2}.$$

В экспериментальном изучении распределения Максвелла задачи исследования вытекают из вида распределения (получение зависимости функции распределения от массы частиц, температуры газа, наивероятнейшей скорости и т.д.), а методы исследования определяются способом пространственного разделения частиц, имеющих разные скорости.

Практическая реализация метода ПРЧПСТ (пространственного разделения частиц, имеющих разные скорости, за счет влияния силы тяжести на дальность полета) сопряжена с рядом технических трудностей. Молекулы реальных газов обладают большой среднеквадратичной скоростью ($v_{кв} \sim 10^2 - 10^3$ м/с при комнатной температуре). При этом их дальность полета в поле силы тяжести могла бы составить $\sim 10^4 - 10^5$ м (в вакууме). Реализация этих условий ни в научной, ни в учебной лаборатории невозможна. Поэтому в эксперименте используется механическая модель идеального газа:



Ольга Геннадьевна Ревинская,
к.п.н., зав. лабораторией кафедры
теоретической
и экспериментальной физики
Тел.: (3822) 417-028
Эл. почта: ogr@tpu.ru
Национальный исследовательский
Томский политехнический
университет
www.tpu.ru

Olga G. Revinskaya,
Candidate of Pedagogical Science,
Laboratory head of Theoretical and
Experimental Physics Department
Tel.: (3822) 417-028
E-mail: ogr@tpu.ru
National Research Tomsk Polytechnic
University
www.tpu.ru

роль частиц газа играют шарики одинаковой массы, размеры которых позволяют вести визуальное наблюдение за ними. Очевидно, что из-за большой массы наблюдать тепловое движение шариков нельзя. Поэтому шарики приводятся в движение за счет сообщения системе внешней механической энергии. Способ подведения механической энергии к ансамблю шариков и величина получаемой ими средней кинетической энергии зависят от технической конструкции экспериментальной установки.

Для корректного определения скоростей частиц по дальности их полета необходима такая конструкция отверстия в сосуде, при которой частицы будут вылетать из него под известным углом по отношению к горизонту. Традиционно в различных экспериментальных установках это требование реализуется с помощью некоторой системы последовательных отверстий (или щелей), которые позволяют выделить частицы, движущиеся только в заданном направлении.

При проведении эксперимента частицы вылетают из сосуда постепенно. После того как часть частиц покинула сосуд, упругие столкновения между частицами внутри сосуда очень быстро приводят к перераспределению частиц по скоростям (перераспределению энергий). Частицы, вылетевшие из сосуда позже, будут иметь другое распределение по скоростям, соответствующее меньшей средней кинетической энергии (температуре). Поэтому для получения корректных результатов необходимо поддерживать в сосуде постоянное распределение частиц по скоростям.

Техническое решение этих проблем определяет особенности экспериментальной установки, реализующей метод изучения распределения Максвелла по скоростям за счет отклонения вылетевших из сосуда частиц в поле силы тяжести.

Экспериментальная установка

В экспериментальной установке, описанной в [1, 3], в качестве частиц используются полиэтиленовые шарики. Механическая энер-

гия, заставляющая шарики двигаться хаотически в сосуде, сообщается системе путем нагнетания потока воздуха через отверстия, расположенные в нижней части сосуда (рис. 1). Так как опыт по изучению распределения Максвелла описан качественно, то устройство отверстия, обеспечивающего горизонтальное направление скорости частиц, вылетевших из сосуда, и метод поддержания постоянного распределения частиц по скоростям в сосуде в [1, 3] не описываются.

В лабораторной установке фирмы RHYWE Systeme GmbH & Co (Германия) в качестве частиц используются стеклянные шарики. Шарики приводятся в движение за счет колебаний пластины, расположенной в основании прямоугольного сосуда (рис. 2). Интенсивность колебаний пластины может регулироваться с помощью генератора. Сочетание интенсивности колебаний пластины с объемом сосуда, в котором находятся шарики, определяет среднюю кинетическую энергию шариков в сосуде $\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT$, выраженная в единицах температуры, она может быть интерпретирована как эффективная температура «газа». Однако конструкция установки такова, что о числовом значении эффективной температуры можно судить только по полученным экспериментально значениям наивероятнейшей скорости.

Отверстие в сосуде оборудовано двумя диафрагмами разного диаметра, расположенными соосно на некотором расстоянии друг от друга. Такая конструкция отверстия позволяет получить поток шариков, вылетающих из сосуда горизонтально, а шарики, имеющие вертикальную составляющую скорости, возвращаются в сосуд.

Постоянное распределение частиц в сосуде достигается непрерывным добавлением частиц в сосуд, которое вручную осуществляет экспериментатор, поддерживая постоянную концентрацию, а значит, и постоянное количество соударений частиц друг с другом.

В процессе эксперимента отсеки кюветы-приемника постепенно наполняются, создавая (при извес-

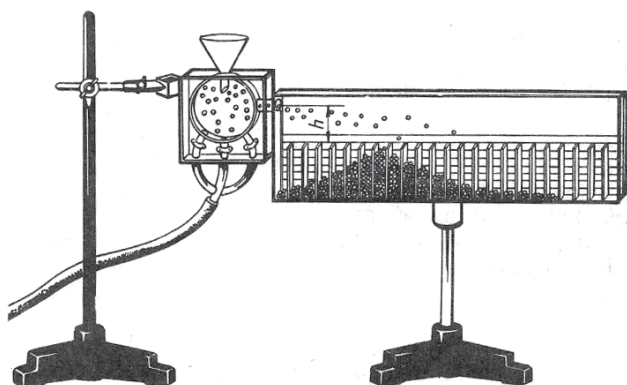


Рис. 1. Модель экспериментальной установки для изучения распределения Максвелла [1, 3]

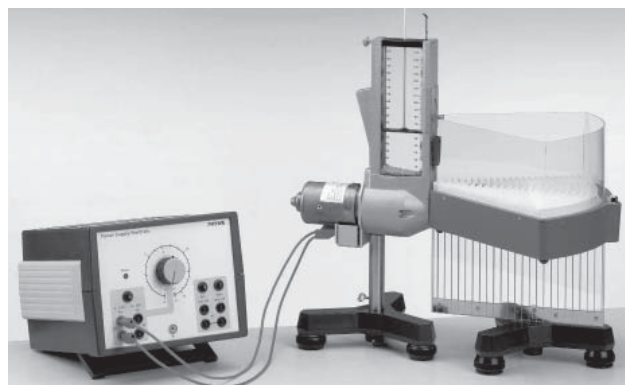


Рис. 2. Лабораторная установка фирмы PHYWE Systeme GmbH & Co для изучения распределения Максвелла

тной связи дальности полета в поле силы тяжести с начальной скоростью частиц) визуальное представление распределения Максвелла по скоростям.

Предельная величина скорости частиц, которая может быть зафиксирована с помощью данной установки, определяется длиной (24 см) кюветы-приемника, которая разделена на 24 отсека. Отверстие располагается на высоте 6–8 см. Это позволяет фиксировать частицы со скоростями не больше 2–2,2 м/с. При варьировании средней кинетической энергии ансамбля частицы в сосуде (интенсивности колебаний основания сосуда) необходимо помнить, что частицы, имеющие слишком большую скорость, будут ударяться о заградительную стенку, окружающую кювету-приемник, и возвращаться в один из отсеков кюветы-приемника, нарушая истинную картину распределения. Поэтому необходимо так подбирать среднюю кинетическую энергию (эффективную температуру) ансамбля частиц в сосуде, чтобы доля частиц со скоростями больше 2 м/с была мала (< 5–10%). Это требование значительным образом сужает диапазон эффективных температур «газа», доступный для экспериментального исследования на данной установке.

В учебном пособии [4] предлагается на основе экспериментальных данных, полученных на данной установке, изучить отношение между характерными скоростями распределения Максвелла (наивероятнейшей v_0 , сред-

ней v_{cp} , среднеквадратичной $v_{кв}$): $v_0:v_{cp}:v_{кв} = 1:1,13:1,22$. При этом значение наивероятнейшей скорости определяется из положения максимума функции распределения, а при вычислении средней и среднеквадратичной скоростей интегрирование на бесконечном интервале от функции распределения заменяется конечным суммированием по всем отсекам кюветы-приемника:

$$v_{cp} = \int_0^{\infty} vF(v)dv \approx \frac{1}{N} \sum_i v_i \Delta N_i$$

$$v_{кв}^2 = \int_0^{\infty} v^2 F(v)dv \approx \frac{1}{N} \sum_i v_i^2 \Delta N_i$$

Следует отметить, что данное приближение справедливо, если в распределении отсутствуют частицы со скоростями больше предельных (> 2 м/с) для данной установки. Данное условие выполняется, если наивероятнейшая скорость не превышает 0,7–0,8 м/с, т.е. максимальное количество шариков наблюдается в 8–9-м отсеке кюветы-приемника. Эти параметры определяют предельные условия (интенсивность колебаний пластины, сообщающей ансамблю шариков необходимую механическую энергию) проведения эксперимента на данной установке – максимальную эффективную температуру. Уменьшение эффективной температуры приведет к уменьшению наивероятнейшей скорости. Чтобы это уменьшение было визуально и статистически ощутимым, оно должно составлять 0,3–0,5 м/с (максимальное количество шари-

ков должно наблюдаться в 4–6-м отсеках). Это означает, что практически эксперимент может быть корректно реализован не более чем при двух значениях наивероятнейшей скорости.

В комплект лабораторной работы входят шарики только одной массы. Это препятствует изучению зависимости распределения Максвелла от массы частиц.

Анализ показывает, что особенности установки позволяют проводить исследования распределения Максвелла только в целом от наивероятнейшей скорости v_0 [4] (а не от массы частиц m или эффективной температуры T «газа»), варьируя v_0 в небольших пределах.

Практика использования лабораторной установки фирмы PHYWE в учебном процессе Национального исследовательского Томского политехнического университета подтвердила высокие наглядно-демонстрационные свойства представленного оборудования. Однако извлечение шариков из отсеков для определения их количества ΔN_i вызывает значительные затруднения. Эти затруднения накладывают ограничения на возможность многократного выполнения эксперимента, необходимого для получения статистически достоверных результатов. Основные усилия студентов при выполнении предложенной лабораторной работы направлены не столько на анализ функции распределения частиц по скоростям, сколько на выполнение рутинных операций по извлечению шариков. Компактность

установки накладывает ограничения на выбор условий, при которых можно получить хотя бы два распределения Максвелла, наивероятнейшие скорости которых были бы статистически различимы.

Кроме того, малая высота расположения отверстия (6–8 см) и дальность полета (< 24 см) приводят к тому, что время полета частиц настолько мало, что студенты в процессе эксперимента наблюдают не за движением частиц с разными скоростями, а за наполнением отсеков кюветы-приемника.

Компьютерная лабораторная работа

Следует отметить, что метод ПРЧПСТ сам по себе не накладывает ограничений на возможность изучения зависимости распределения Максвелла от массы частиц и эффективной температуры «газа». Поэтому при другой технической реализации установки данные исследования могут быть проведены. Это было показано в лабораторной работе по изучению моделей физических явлений и процессов на компьютере «Распределение Максвелла», разработанной на кафедре теоретической и экспериментальной физики Национального исследовательского Томского политехнического университета (рис. 3).

Работа позволяет проводить исследование с частицами различной массы при различных эффективных температурах [5] (по 3 и при необходимости более значений m и T со статистически различимыми результирующими распределения-

ми). При этом также используется пространственное разделение частиц, движущихся с разными скоростями, за счет влияния силы тяжести на их дальность полета.

В работе реализована схема эксперимента в обобщенном виде. Принципиальная конструкция отверстия, создающего в области эксперимента поток частиц с заданным направлением скорости, здесь не рассматривается. Это связано с тем, что основной задачей предложенной работы является изучение теоретической физической (идеальной) модели, а не воспроизведение технической реализации конкретной экспериментальной установки. Поэтому в работе постулируется, что частицы вылетают из отверстия перпендикулярно плоскости поперечного сечения отверстия под одним и тем же углом по отношению к горизонту. Положение отверстия на сферической поверхности сосуда задается полярным углом (от 0 до 180°), под которым частицы и вылетают из сосуда. При этом в работе экспериментатор может располагать отверстие на поверхности сосуда так, чтобы частицы в разных опытах вылетали из сосуда под различными углами, а не только горизонтально. Это позволяет подчеркнуть и экспериментально проверить, что функция распределения Максвелла зависит только от модуля скорости и не зависит от ее направления. Для этого студенты проводят опыты с частицами одной и той же массы при одной и той же эффективной температуре, выпуская частицы из сосуда под разными углами. Несмотря на то что

при этом частицы засыпают разные области пространства, их скорости подчиняются одному и тому же распределению. Этот важный методический момент в изучении распределения Максвелла в натурном эксперименте пока не реализован.

Расположение отверстия на поверхности сосуда под разными углами позволяет рассмотреть еще одну особенность используемого метода ПРЧПСТ. Если частицы вылетают из сосуда горизонтально ($\alpha = 0$), дальность полета линейно зависит от модуля скорости $x = v\sqrt{2h/g}$. В остальных случаях ($\alpha > 0$) дальность полета зависит от модуля скорости нелинейно. То есть ячейке, расположенной далеко от сосуда, будет соответствовать больший диапазон скоростей, чем ячейке той же длины вблизи сосуда. Эта особенность метода не препятствует получению информации о статистическом распределении частиц «газа» по скоростям, но на нее также необходимо обратить внимание, чтобы сформировать полное представление об используемом методе. Данная компьютерная лабораторная работа предоставляет для этого необходимые дидактические возможности.

Для поддержания постоянного распределения частиц «газа» по скоростям в сосуде выбрана модель полностью невзаимодействующих друг с другом материальных точек (столкновения между частицами отсутствует), что позволяет избежать перераспределения кинетической энергии между частицами в сосуде после того, как часть частиц покинула сосуд. В условиях компьютерной реализации идеальной теоретической модели этого легко добиться. Таким образом, в сосуде частицы как материальные точки испытывают только упругие столкновения со стенками сосуда, что не влияет на распределение их скоростей по модулю.

Для определения количества частиц, попавших в ту или иную ячейку, в работе предусмотрен датчик (ползунок), который находится под плоскостью, на которую падают вылетевшие из сосуда частицы (см. рис. 3). Экспериментатор может произвольно перемещать дат-

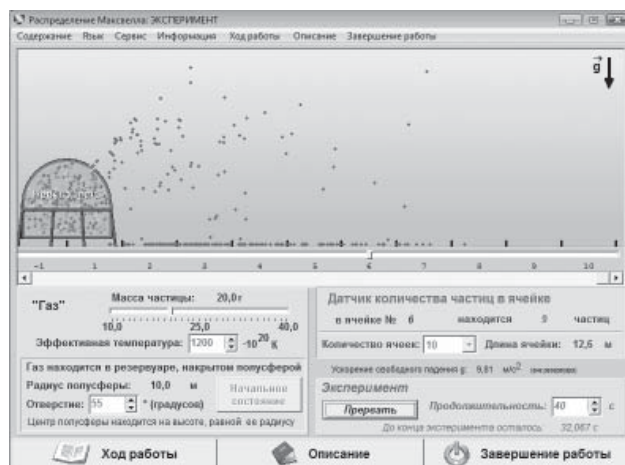


Рис. 3. Компьютерная лабораторная работа «Распределение Максвелла» (Национальный исследовательский Томский политехнический университет)

чик из одной ячейки в другую. При этом на соответствующей панели инструментов автоматически отображается количество частиц, находящихся в данный момент в ячейке. Это позволяет определять количество частиц в ячейке, не извлекая частицы из нее. При изменении массы или эффективной температуры вылетевшие из сосуда частицы могут засыпать различные по протяженности области пространства, в результате для получения статистически достоверной информации у студента возникает потребность экспериментально решать вопрос, на сколько ячеек необходимо разбить горизонтальную поверхность вблизи сосуда. Так как и измерение количества частиц, и изменение количества ячеек на плоскости вблизи сосуда происходит без извлечения частиц из ячеек, данная задача решается без выполнения повторных опытов. После проведения эксперимента студент подбирает количество ячеек так, чтобы основная масса вылетевших частиц располагалась в 15–20 ячейках в соответствующей области пространства, и измеряет количество частиц в каждой из них. При выполнении натурной лабораторной работы операции по изменению расположения ячеек (отсеков кюветы-приемника) недоступны.

Выбор диапазона регистрируемых в компьютерной работе скоростей ($< 30\text{--}35$ м/с) связан с возможностью визуального наблюдения за движением вылетевших из сосуда частиц. Учитывая значение ускорения свободного падения ($9,8$ м/с²), частицы, обладавшие малыми начальными скоростями (< 5 м/с), очень быстро падают в ячейки так, что экспериментатор не может визуально зафиксировать, являлось ли это движение параболическим. Чтобы констатировать применение метода ПРЧПСТ, необходимо наблюдать параболическое движение большинства вылетевших из сосуда частиц, т.е. время их полета должно быть не менее 1–5 с. Поэтому большинство частиц, участвующих в эксперименте, должны иметь скорости в пределах от 5 до 25 м/с. Тогда длительность эксперимента, обеспечивающая накопление в

ячейках достоверных статистических данных, будет составлять 40–60 с. Для привлечения внимания студентов к частицам, движущимся в поле силы тяжести, они выделены красным цветом (см. рис. 3). Исходя из этих рассуждений, при реализации работы были подобраны соответствующие диапазоны изменения основных параметров (массы частиц и эффективной температуры «газа»), размеры области эксперимента и сосуда так, чтобы используемый диапазон скоростей движения частиц «газа» позволял максимально раскрыть физическую суть применяемого метода пространственного разделения частиц, имеющих различные скорости, за счет влияния силы тяжести на их дальность полета.

Таким образом, компьютерная лабораторная работа «Распределение Максвелла» решает в учебном процессе более широкую по сравнению с натурным экспериментом методическую задачу: она позволяет не только исследовать зависимость функции распределения от массы частиц и температуры «газа», но и от направления скорости частиц, а также экспериментально обосновать продолжительность проведения эксперимента и количество используемых ячеек для получения статистически достоверного набора данных.

Методические указания по организации исследования модели на компьютере представлены как в традиционном печатном, так и в электронном виде. Электронная версия рекомендуемой последовательности выполнения работы приведена в разделе «Ход работы» (см. рис. 3) в интерактивном виде. Каждый логический этап исследования сформулирован как локальная задача. Интерактивный характер взаимодействия с электронным ходом работы позволяет загружать подробные методические указания к отдельным задачам. Эти указания носят рекомендательный характер и направлены на физическое обоснование принципов исследования. Количество, последовательность и продолжительность операций, выполняемых студентом в процессе изучения модели, компьютерной

программой не регламентируется. Поэтому студенты выполняют операции, способствующие решению поставленных задач, в удобной для них последовательности и темпе. Это позволяет стимулировать формирование осмысленной, произвольной деятельности студентов по изучению физических моделей на компьютере.

Заключение

Сочетание в лабораторном практикуме натурного эксперимента на основе комплекта приборов, разработанного фирмой RHYWE, с изучением физической модели на компьютере позволяет полностью раскрыть физическую суть и технические особенности одного из самых наглядных для изучения распределения Максвелла методов пространственного разделения частиц, имеющих разные скорости – метода ПРЧПСТ.

В компьютерной лабораторной работе реализованы обобщенные методы измерения, управляемые с помощью элементов стандартного интерфейса Windows-приложений, использование которых исключает необходимость осваивать вспомогательные действия по управлению моделью. Используемый в работе инструментарий позволяет выполнить большой комплекс исследований: зависимость функции распределения от массы частиц, эффективной температуры «газа», наивероятнейшей скорости, направления движения. Натурная лабораторная работа благодаря особенностям своей технической реализации позволяет выполнить измерения по методу ПРЧПСТ для одного набора физических параметров распределения Максвелла. Но на ее примере студенты знакомятся с конкретной приборной реализацией элементов экспериментальной установки, таких как устройство отверстия, создающего мононаправленный поток частиц, разделение пространства около сосуда с частицами на отсеки (ячейки) для измерения количества вылетевших частиц и т.д.

Компьютерная лабораторная работа выступает как доказатель-

ное обоснование возможности применения метода ПРЧПСТ для изучения распределения Максвелла в эксперименте. Поэтому целесообразно начинать лабораторные исследования распределения Максвелла с выполнения компьютерной работы. Здесь метод ПРЧПСТ представлен всесторонне в виде, максимально соответствующем его идеальной теоретической природе. Освоение обобщенной сути метода пространственного разделения частиц на сбалансированной системе упражнений с компьютерной моделью создает устойчивую мотивацию для сознательного выбора условий натурального эксперимента (интенсивности колебаний пластины основания сосуда, обеспечивающей падение вылетевших частиц в заданную область пространства).

По сути, студенты при выполнении обеих работ выполняют исследовательскую деятельность противоположной направленности: в компьютерной работе анализируют, как при разных физических параметрах исследуемой системы вылетевшие частицы засыпают разные области пространства; а в натурной работе, наоборот, подбирают такие параметры, при которых вылетевшие частицы засыпают заранее заданную область. Качественное сравнение результатов, полученных для разных скоростных диапазонов, используемых в рассмотренных работах, является дополнительным стимулом для обобщения индивидуальных знаний и навыков, приобретенных студентами.

Таким образом, опыт использования описанных в статье работ

в учебном процессе преподавания курса общей физики Национального исследовательского Томского политехнического университета показал, что компьютерная и натурная лабораторные работы по изучению распределения Максвелла методом пространственного разделения частиц за счет влияния силы тяжести на дальность их полета методически и методологически дополняют друг друга, позволяя студентам не только освоить сложный теоретический материал, но и практически изучить методы его экспериментального обоснования. Этот опыт позволяет актуализировать направление модернизации лабораторного практикума в курсе общей физики, отвечающее потребностям и возможностям современного учебного процесса в вузе.

Литература

1. Физика: учеб. пособие для 10 кл. шк. / О.Ф. Кабардин, В.А. Орлов, Э.Е. Эвенчик и др.; под ред. А.А. Пинского. – М.: Просвещение, 1995. – 415 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики: учеб. пособие для вузов: в 5 т. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Физматлит, 2005. – 544 с.
3. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Методика преподавания общей физики в высшей школе. – К.: «Освита Украины», 2009. – 415 с.
4. Изучение распределения Максвелла на модели газа: методические указания к лабораторной работе по курсу общей физики / О.В. Сергеева. – Петрозаводск, 2008. – 24 с.
5. Кравченко Н.С., Ревинская О.Г. Физическая модель для изучения распределения Максвелла в лабораторном практикуме и ее реализация на компьютере // Учебная физика – 2010. – № 5 – С. 48–56.