А. С. Кондратьев, Л. А. Ларченкова, А. В. Ляпцев

КАЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ФИЗИКИ

Обсуждается значение качественных методов в физике и при обучении физике. В частности, подчеркивается особая роль качественных методов при *использовании вычислительных методов для решения задачи. Приводятся примеры совместного использования качественных и вычислительных методов.*

Ключевые слова: качественные методы, вычислительные методы, физическое понимание, качественное исследование, анализ размерности.

A. Kondratyev, L. Larchenkova, A. Lyapzev

QUALITATIVE METHODS IN TEACHING PHYSICS

The relevance of qualitative methods in physics and physical education is discussed. In particular the significance of qualitative methods is emphasized when computational methods are used to solve a problem. Some examples of combination of qualitative and computational methods are considered.

Keywords: qualitative methods, computational methods, physical understanding, qualitative investigation, dimensional analysis.

Качественные методы исследования физических явлений всегда играли большую роль при изучении физики на всех уровнях обучения, начиная со средней школы [9, с. 3] и заканчивая теоретической физикой [7].

Ситуация с качественными методами анализа приобретает особую новую окраску в настоящее время, характеризующееся бурным внедрением персонального компьютера как в научные исследования, так и в процесс обучения. Долгое время теоретическая физика стремилась к построению аналитических решений изучаемых проблем. Такой подход казался единственно возможным способом описания явлений. Однако многие важные и актуальные проблемы не допускали такого решения.

В настоящее время универсальный подход к таким ситуациям, связанный с использованием персонального компьютера, зашел так далеко, что во многих случаях отпала необходимость построения аналитического решения. Однако, обеспечив невиданный прогресс в развитии количественных методов исследования, этот процесс с особой остротой поставил вопрос об адекватном развитии физического понимания. Как отмечал Р. Фейнман, «The next era of awakening of human intellect may well produce a method of understanding the *qualitative* content of equations» (Грядущая эра пробуждения человеческого разума приведет к пониманию качественного аспекта уравнений) [10, с. 201]. И далее он поясняет свою мысль примером: «Look at the equations for the atomic and molecular forces in water, and you can’t see the way water behaves; you can’t see turbulence» («Взгляните на уравнения для атомных и молекулярных сил в воде, и вы не увидите, каким образом вода ведет себя; вы не увидите турбулентности») [10, с. 202]. Таким образом, становится очевидной задача соответствующего развития и использования качественных методов, что обеспечивает характерную для физики сбалансированность качественных и количественных методов исследования, а также сохраняет и развивает в новых условиях предсказательную функцию физической теории [5, с. 11–14].

Под качественными методами в современной физике понимают огромный спектр различных подходов, не связанных с последовательными систематическими математическими преобразованиями и вычислениями — от использования общих методологических принципов, таких как симметрия, относительность, толерантность и т. д., от фундаментальных законов природы, таких как законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда и т. д. до простых размерных оценок. При этом объектом применения качественных методов могут быть как уравнения, описывающие систему (т. е. ее математическую модель), так и сама изучаемая система в процессе создания ее физической модели. Одним из наиболее эффективных качественных методов является метод подобия и размерностей, позволяющий в ряде случаев составить полную качественную картину поведения изучаемой системы на этапах создания ее физической и математической моделей, которые часто оказываются тесно переплетенными [1, с. 104]. Умение владеть качественными методами характеризует наивысший уровень физического понимания, при котором удается находить ответы на вопросы относительно тех явлений и процессов, для которых нам не известны описывающие их конкретные законы, т. е. в полной мере реализовывать предсказательную функцию физической теории.

Р. Фейнман так комментирует мнение П. Дирака по данному вопросу: «Dirac said that to understand a physical problem means to be able to see the answer without solving equations. May be he exaggerated; may be solving equations is experience you need to get understanding — but until you do understand, you're just solving equations» («Дирак сказал, что понимать физическую проблему означает быть способным увидеть ответ, не решая уравнений. Может быть, он несколько преувеличил, может быть, решение уравнений — это как раз то умение, которое необходимо, чтобы обрести понимание, — но до тех пор, пока не обрели понимание, вы просто решаете уравнения») [10, с. 202].

Проиллюстрируем сказанное на примере гармонического осциллятора — одной из основных базовых моделей многих разделов теоретической физики [8]. Классический осциллятор характеризуется массой m (с размерностью M) и коэффициентом жесткости пружины k (с размерностью MT^{-2}). Сразу видно, что в системе отсутствует безразмерный параметр и параметр с размерностью длины. Единственным параметром, имеющим размерность времени, является квадратный корень из отношения m/k, т. е. $\sqrt{m/k}$, который с точностью до численного множителя определяет период колебаний. Отсутствие параметра с размерностью длины означает возможность существования любых значений энергии осциллятора.

В квантовом случае к параметрам m и k добавляется постоянная Планка $\hbar$ (с размерностью ML^2T^{-1}). В системе по-прежнему отсутствует безразмерный параметр, по-прежнему единственным параметром с размерностью времени является $\sqrt{m/k}$ (это означает, что период колебаний у квантового осциллятора такой же, как и у классического), но теперь появился параметр с размерностью длины, равный $\sqrt{\hbar/\sqrt{mk}}$. А это сразу означает, что полная энергия осциллятора (равная в точке остановки его потенциальной энергии $kA^2/2$, где A — амплитуда колебаний) может принимать дискретные значения, кратные кванту колебаний, равному $\hbar\omega$, где $\omega = \sqrt{k/m}$. Спектр энергии гармонического осциллятора становится квантованным. Вычисленные характеристики квантового осциллятора, определяющие все его свойства, оказались установленными в результате качественного анализа, без решения уравнений [11, с. 22].

Аналогичным образом могут быть установлены квантовые свойства атома водорода. В пренебрежении движением ядра атом водорода характеризуется двумя параметрами — массой электрона m_e и квадратом элементарного заряда e^2. Легко видеть, что при этом нет безразмерного параметра и параметров с размерностями длины и времени. Это означает возможность обращения электрона вокруг ядра по любым круговым орбитам. В квантовом случае добавляется постоянная Планка ħ. Из параметров m_e, e^2 и ħ, имеющих размерности $[m] = M$; $[e^2] = ML^3T^{-2}$; $[\hbar] = ML^{-2}T^{-1}$ составить безразмерный параметр невозможно, но можно составить параметры:

— с размерностью длины

$$l \sim \frac{\hbar^2}{me^2} = a_0 \,, \qquad (1)$$

совпадающий с радиусом Бора;

— с размерностью времени

$$\tau \sim \frac{\hbar^3}{me^4} \,. \qquad (2)$$

Теперь можно составить параметр с размерностью скорости

$$v \sim \frac{l}{\tau} \sim \frac{a_0}{\tau} = \frac{e^2}{\hbar}$$

и записать выражение для энергии

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{a_0} = -\frac{me^4}{2\hbar^2},$$

которое совпадает с выражением, получающимся в модели атома Бора для наименьшего значения E.

Следует обратить внимание на то, что для получения столь принципиального смыслового результата не понадобились ни конкретные физические законы, описывающие движение электрона в атоме, ни постулат Бора о квантовании момента импульса. Это обстоятельство имеет чрезвычайно важное методическое значение при обучении физике учащихся школ в непрофильных классах.

Введение дополнительных сведений позволяет уточнить полученные результаты. Физический смысл параметра времени (2) можно уяснить, если воспользоваться представлением о круговом движении электрона:

$$m\omega^2 a_0 = \frac{e^2}{a_0^2},$$

откуда с учетом выражения (1):

$$\omega = \frac{m\,e^4}{\hbar^3} \sim \tau^{-1}.$$

Таким образом, параметр (2) характеризует угловую скорость движения электрона в стационарном состоянии.

Теперь можно оценить законность исключения параметра *c* (скорость света в вакууме) из числа параметров, определяющих свойства рассматриваемой системы. Домножив и разделив выражение для модуля *E* на c^2, имеем:

$$|E| = \frac{me^4}{\hbar^2} \cdot \frac{c^2}{c^2} = mc^2\alpha^2,$$

где

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$$

— постоянная тонкой структуры, характеризующая интенсивность электромагнитного взаимодействия. Видно, что характерная энергия электрона в атоме водорода пренебрежимо мала по сравнению с релятивистской энергией mc^2, что оправдывает отбрасывание параметра *c*.

С помощью метода анализа размерностей могут быть проанализированы свойства квантовой плазмы (т. е. электронной жидкости металлов и полупроводников) и установлены все параметры, определяющие равновесные и кинетические свойства таких систем [5, с. 75].

Как уже отмечалось выше, особое значение качественных методов исследования проявляется при решении достаточно сложных задач с использованием персонального компьютера. Убедительным примером здесь является задача о соскальзывании шайбы с поверхности полусферы при учете силы сухого трения, описываемой законом Кулона—Амонтона. Эта задача может быть решена аналитически [2, с. 20–24], но подстановка начальных условий в полученное решение приводит к таким сложным тригонометрическим уравнениям, что предпочтительнее оказывается с самого начала численно решать дифференциальное уравнение движения [3, с. 49]. При этом, однако, в значительной степени затемняется физический смысл решения. Качественный анализ исходных дифференциальных уравнений позволяет представить общую картину движения, в частности, предсказать обязательность отрыва шайбы от поверхности полусферы при определенных значениях коэффициента трения и начальных условий, причем соответствующий анализ может быть проведен таким же образом, как и рассмотрение этого вопроса в элементарной физике при отсутствии силы трения [5, с. 12].

Еще один убедительный пример эффективности качественных методов дает исследование поведения машины Атвуда в необычных условиях, когда использование приближенных уравнений движения, предшествующее численному решению точных уравнений, позволяет установить общую картину движения и понять результаты точного расчета [4, с. 3–12]. Использование качественных методов при анализе численных расчетов не только дает возможность обосновать «разумность» полученных результатов, но может служить отправной точкой для развития приближенных аналитических расчетов, позволяющих рассмотреть некоторые предельные случаи исследуемой модели. Для иллюстрации сказанного рассмотрим два примера.

Первый пример — исследование движения конического маятника — математического маятника, способного совершать колебания в двух плоскостях [3, с. 131]. Обычный математический маятник может быть рассмотрен как частный случай конического маятника. Этот частный случай реализуется при начальных условиях, когда начальная скорость равна нулю или лежит в плоскости, проходящей через начальную координату и положение равновесия. Как известно, в этом случае плоскость колебаний в инерциальной системе отсчета сохраняет свою ориентацию в пространстве, а поворот плоскости колебаний свидетельствует о неинерциальности системы отсчета (маятник Фуко). При начальных условиях, отличных от вышеприведенных, и при малых отклонениях маятника траектория его движения близка к эллипсу. Строго эллиптическая траектория получается при сложении двух гармонических взаимно перпендикулярных колебаний с одинаковыми частотами (простейшая фигура Лиссажу). Численные расчеты показывают, что для конического маятника эллипс совершает прецессию, то есть оси эллипса поворачиваются. Аналогичная прецессия эллиптической орбиты Меркурия объясняется релятивистскими поправками в движении планеты. Результат численного расчета, иллюстрирующий прецессию орбиты конического маятника при величинах большой и малой полуосей 0,2 и 0,1 радиан, приведен на рис. 1.

Качественное объяснение прецессии орбиты несложно получить на основе простых соображений. В данном случае движение образуется сложением двух колебаний, близких к гармоническим. Незначительная ангармоничность приводит к тому, что колебание с большей амплитудой имеет немного больший период. Это означает, что за время одного колебания вдоль большой оси вдоль малой оси произойдет чуть больше одного колебания (рис. 2) и точка максимального удаления от центра сдвинется относительно аналогичной точки на предыдущем периоде.

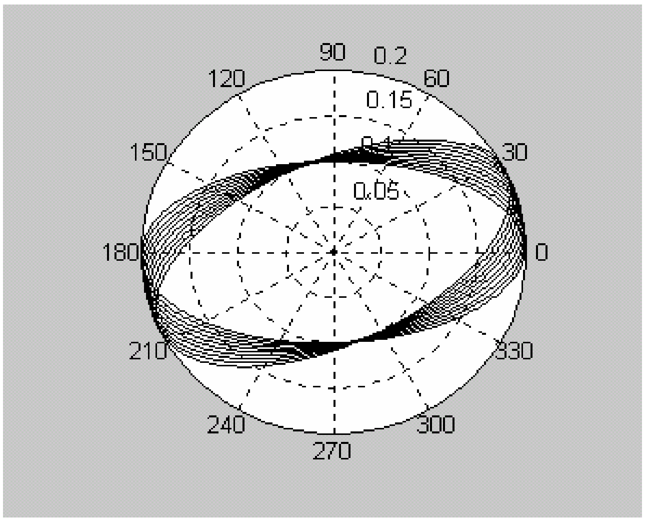

Рис. 1

Понимание эффекта на качественном уровне позволяет реализовать доступные для объяснения на школьном уровне приближенные методы при расчете скорости прецессии орбиты. Однако при рассмотрении на более высоком уровне, в частности при изучении методов теории групп, данное качественное объяснение позволяет развить иные аналитические методы. Можно показать, что симметрия двумерного гармонического осциллятора при рассмотрении этой классической задачи приводит к появлению инвариантов, один из которых соответст-

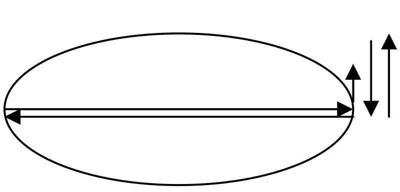

Рис. 2

вует постоянству ориентации эллиптической орбиты. При учете ангармоничности группа симметрии понижается, следствием чего является прецессия орбиты. Интересные результаты получаются при переходе к аналогичной квантовой задаче, описывающей, в частности, колебания в линейных многоатомных молекулах, где подобное понижение симметрии приводит к расщеплению уровней энергии молекулы.

Вторым примером является задача о движении заряженной частицы в магнитном поле прямолинейного проводника с током [3, с. 240]. На школьном уровне обычно ограничиваются изучением движения заряженных частиц в однородном магнитном поле, когда траектория частицы представляет собой винтовую линию с осью винта, направленной по линии магнитного поля. При рассмотрении движения частицы в поле, близком к однородному, качественно движение частицы описывается винтовой линией, которая «накручивается» на линию магнитного поля, уже отличную от прямой. Именно этим объясняют движение приходящих от Солнца заряженных частиц в магнитном поле Земли по направлению к полюсам.

Однако подобное описание характера движения в неоднородном поле является приближенным, так что численный расчет движения заряженной частицы в поле прямолинейного проводника приводит к траектории, имеющей вид двойной винтовой линии (рис. 3), а не винтовой линии, «накрученной» на замкнутую линию магнитного поля.

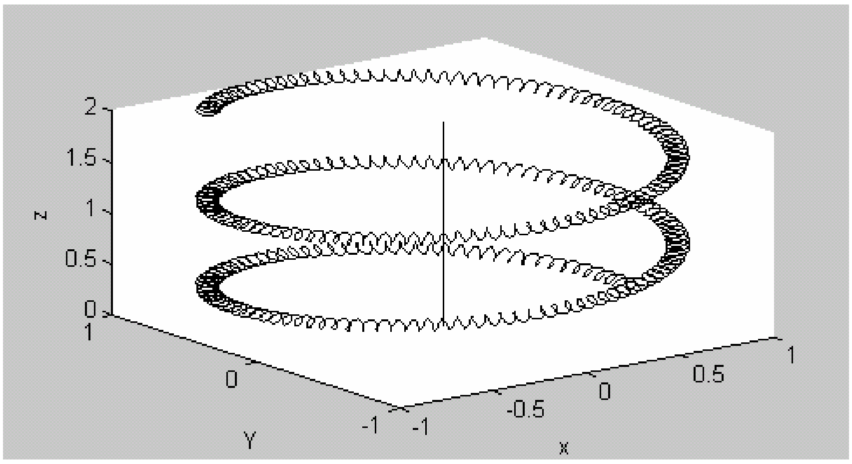

Рис. 3

Качественное объяснение такому движению можно дать, рассмотрев случай малых скоростей, когда шаг винта и радиус винтовой линии оказываются малыми по сравнению с расстоянием до проводника. В этом случае можно перейти в систему отсчета, вращающуюся вокруг оси, проходящей через проводник, так что в новой системе отсчета траектория становится плоской линией (рис. 4).

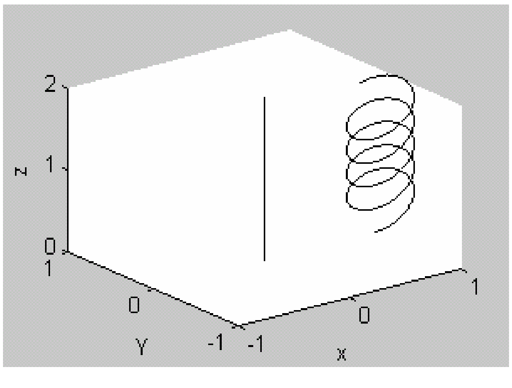

Рис. 4

Несложно понять, что траектория движения в новой системе отсчета близка к окружности, дрейфующей по линии, параллельной проводнику. Качественно дрейф окружности объясняется просто. В однородном магнитном поле, когда траектория является окружностью, ее радиус обратно пропорционален индукции магнитного поля. В неоднородном поле кривизна траектории (величина, обратно пропорциональная радиусу вписанной в траекторию окружности) больше в области, более близкой к проводнику. Можно приближенно считать, что полуокружность, лежащая ближе к проводнику, имеет меньший радиус, чем полуокружность, лежащая дальше от проводника. При движении по меньшей полуокружности (приблизительно полпериода) частица смещается вдоль проводника на меньшее расстояние, чем при движении по большей полуокружности. Это и объясняет дрейф окружности.

Данное качественное объяснение также может служить основой приближенного расчета скорости дрейфа окружности [3, с. 245], причем соответствующий расчет может быть проведен на уровне, доступном для учащихся школы. Полученные результаты соответствуют расчетам, осуществляемым методами теоретической физики [6, с. 83].

Приведенные примеры убедительно показывают, что в современных условиях наиболее важным для обучения является овладение учащимися качественными методами анализа физической ситуации, позволяющими не только объяснять различные физические явления, но и предсказывать характер протекания различных процессов и возможно новые физические эффекты. Поэтому в настоящее время правильнее было бы говорить не столько о применении качественных задач в обучении, сколько о применении качественных методов анализа при выполнении учащимися разных видов деятельности.

Следует отметить, что традиционно в школьном курсе физики применение качественных методов практически ограничивалось решением особого вида задач или задач-вопросов, причем преимущественно в основной школе. При этом качественными называли задачи, решение которых осуществлялось путем построения логической цепочки рассуждений и не требовало обязательных математических выкладок и вычислений. Все формульные преобразования и расчеты в таких задачах использовались только для качественного анализа и количественной оценки порядка физической величины. Основным назначением таких задач считалось развитие логического мышления учащихся и отработка структурных элементов знаний. При организации учебных занятий качественные задачи использовались, прежде всего, для активизации познавательной деятельности учащихся. Не умаляя и не отвергая традиционное значение качественных задач в обучении, следует отметить в современных условиях смену приоритетов и выход на первый план необходимости формирования знаний и умений методологического характера, что является основой физического понимания. Значительное упрощение расчетов и широкое распространение медиаресурсов, компьютерных моделей физических явлений, компьютерная обработка и представление результатов натурного физического эксперимента в табличном и графическом видах позволяют перевести в разряд качественных целый спектр учебных задач, ранее считавшихся доступными только для аналитического решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бордовский Г. А., Кондратьев А. С., Чоудери А. Д. Р.* Физические основы математического моделирования: Учеб. пособие для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 320 с.
2. *Кондратьев А. С., Ляпцев А. В.* Математическое моделирование: аналитические и вычислительные методы // Компьютерные инструменты в образовании. 2007. № 5. с. 20–24.
3. *Кондратьев А. С., Ляпцев А. В.* Физика. Задачи на компьютере. М.: Физматлит, 2008.
4. *Кондратьев А. С., Ляпцев А. В., Ситнова Е. В.* О развитии физического мышления // Физическое образование в вузах. 2007. Т. 13. № 3. С. 3–12.
5. *Кондратьев А. С., Прияткин Н. А.* Современные технологии обучения физике. СПб., 2006. 342 с.
6. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика. Т. 2. Теория поля. М.: Наука, 1988.
7. *Мигдал А. Б.* Качественные методы в квантовой теории. М.: Наука, 1975.
8. *Мошинский М.* Гармонический осциллятор в современной физике. М., 1972.
9. *Тульчинский М. Е.* Качественные задачи по физике в средней школе. М.: Просвещение, 1972.
10. *Feynman R. P.* The Pleasure of Finding Things Out. Perseus Publ., 1999.
11. *Robinett R. W.* Quantum Mechanics. Oxford Univ. Press, 1997.

REFERENCES

1. *Bordovskii G. A., Kondrat'ev A. S., Chouderi A. D. R.* Fizicheskie osnovy matematicheskogo modelirovaniya. Ucheb. posobie dlya vuzov. M.: Izdatel'skii centr «Akademiya», 2005. 320 s.
2. *Kondrat'ev A. S., Lyapcev A. V.* Matematicheskoe modelirovanie: analiticheskie i vychislitel'nye metody // Komp'yuternye instrumenty v obrazovanii. 2007. № 5. S. 20-24.
3. *Kondrat'ev A. S., Lyapcev A. V.* Fizika. Zadachi na komp'yutere. M.: Fizmatlit, 2008.
4. *Kondrat'ev A. S., Lyapcev A. V., Sitnova E. V.* O razvitii fizicheskogo myshleniya // Fizicheskoe obrazovanie v vuzah. 2007. T. 13. № 3. S. 3–12.
5. *Kondrat'ev A. S., Priyatkin N. A.* Sovremennye tehnologii obucheniya fizike. SPb., 2006. 342 s.
6. *Landau L. D., Lifshic E. M.* Teoreticheskaya fizika. T. 2. Teoriya polya. M.: Nauka, 1988.
7. *Migdal A. B.* Kachestvennye metody v kvantovoi teorii. M.: Nauka, 1975.
8. *Moshinskii M.* Garmonicheskii oscillyator v sovremennoi fizike. M., 1972.
9. *Tul'chinskii M. E.* Kachestvennye zadachi po fizike v srednei shkole. M.: Prosveschenie, 1972.
10. *Feynman R. P.* The Pleasure of Finding Things Out. Perseus Publ., 1999.
11. *Robinett R. W.* Quantum Mechanics. Oxford Univ. Press, 1997.