А. С. Кондратьев, Л. А. Ларченкова

ПРИНЦИП ТОЛЕРАНТНОСТИ ПРИ РЕШЕНИИ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В СРЕДНЕЙ ШКОЛЕ

Обсуждается возможность использования методологических принципов физики при обучении решению физических задач. Такой подход способствует развитию физического понимания и парадоксального характера мышления обучаемых.

A. Kondratyev, L. Larchenkova

TOLERANCE PRINCIPLE IN SOLVING PROBLEMS OF PHYSICS AT SECONDARY SCHOOL

The possibility of the applying methodological principles of physics in teaching solving problems in physics is discussed. The approach stimulates the development of physics awareness and paradoxical character of students' thinking

Среди многочисленных педагогических задач, решаемых при изучении физики в средней школе, одной из основных является задача развития мышления обучаемых, определяющего основные моменты становления их личности. Характерная особенность мышления, формирующегося при изучении физики, проявляется, в частности, в умении «на пальцах», т. е. практически без использования математических средств, получить качественную картину изучаемого явления, а затем — в умении применять совершенные математические методы для создания его полной количественной картины [1]. Именно это доведенное до совершенства сочетание качественного и количественного аспектов описания реальных явлений и продолжает удерживать физику в лидерах современного естествознания и является не формальным их объединением, а составляет самую суть методологии физики, отражая их единство. Увидеть в привычном неочевидное, осмыслить и описать такие находки на языке науки, используя нестандартные и неожиданные подходы, — это проявление некоторой парадоксальности мышления настоящего физика. Количественный аспект изначально заложен в любые физические понятия даже при создании качественной картины, а не привносится позднее. Как пишет Р. Фейнман, «…физику нельзя перевести ни на какой другой язык. И если вы хотите узнать Природу, оценить ее красоту, то нужно понимать язык, на котором она разговаривает. Она дает информацию лишь в одной форме, и мы не вправе требовать от нее, чтобы она изменила свой язык, стараясь привлечь наше внимание… Философы пытаются рассказать о природе без математики. Я пытаюсь описать природу математически» [2].

Современная парадигма теории обучения физике заключается в фундаментальном характере сообщаемых знаний и в превращении учебного процесса в конкретную реализацию учебной модели научного исследования [3]. При этом, как отмечается в работе [4], физика учит анализировать неизвестное и непонятное, находить адекватный язык для описания незнакомой ситуации, устанавливать качественные и количественные соотношения и закономерности и, наконец, находить фундаментальные законы, определяющие полную картину явления. И если при изучении теоретического материала учащийся получает соответствующие фундаментальные знания, то развитие его собственных творческих способностей происходит в основном при решении задач. Методическая система обучения решению физических задач, соответствующая данной парадигме, должна быть основана на последовательном использовании методологии физической науки.

Наиболее существенным моментом данной системы обучения решению физических задач является опора на общие методологические принципы физики, такие, как принцип симметрии, относительности, причинности, суперпози-

ции, толерантности и т. д. Следует отметить, что использование первых из указанных принципов характеризует определенный уровень владения учащимся фундаментальными знаниями и умениями их практического применения, а использование принципа толерантности характеризует способность к осознанному выбору между различными подходами и способами описания рассматриваемого явления, а значит, в определенном смысле отражает уровень сформированности и особого, парадоксального, характера мышления, и ключевых компетентностей учащегося.

Данный подход был предложен в работе [5] и получил дальнейшее развитие в серии научно-методических работ, выполненных на кафедре методики обучения физике РГПУ им. А. И. Герцена [6–8]. Но при этом именно использование принципа толерантности в наименьшей степени оказалось разработанным в научно-методической литературе, хотя отдельные моменты, связанные с этим принципом, рассматривались в работах [9, 10].

Принцип толерантности в неявной форме фигурирует практически в любом школьном учебнике физики при изложении механики, когда демонстрируется использование фундаментальных законов сохранения энергии и импульса, позволяющее в ряде случаев обойтись без применения динамических законов и получить решение задачи гораздо более компактным способом, по существу построив другую математическую модель изучаемого процесса или явления [10]. При изложении физики электромагнитных явлений, термодинамики и молекулярной физики, физики атома, атомного ядра и элементарных частиц о возможности различных подходов уже почти не упоминается. Исключениями являются лишь указания на то, что описание электростатических явлений возможно с позиций концепций дальнодействия и близкодействия, а законы отражения и преломления света на плоской границе двух сред могут быть получены как с точки зрения волновых представлений о свете, так и в рамках геометрической оптики, основанной на рассмотрении лучей света. На этом, как правило, все и заканчивается.

Настоящая работа посвящена анализу вопроса о возможности использования принципа толерантности при последовательном обучении решению физических задач в средней школе.

Невозможность разделения теоретического моделирования достаточно сложных реальных явлений на физический и математический этапы [10, 11] позволяет с единой точки зрения рассматривать использование принципа толерантности как при построении различных физических моделей явления, так и при выборе различного математического аппарата в рамках одной и той же физической модели. Уже в рамках простейших задач гидростатики можно продемонстрировать учащимся возможность использования таких подходов.

Рассмотрим з а д а ч у : *в цилиндрический сосуд с вертикальными стенками и площадью дна* **S** *налита вода, в которую опускают цилиндрический деревянный брусок массой* ***m*** *с площадью поперечного сечения* $\mathbf{S_0}$. *На сколько изменится уровень воды в сосуде?*

Решение данной задачи с помощью закона Архимеда подразумевает установление того факта, что объем воды, вытесненной со своего места погрузившимся бруском (показанный серым цветом на рис. 1), равен объему воды, поднявшейся в сосуде выше первоначального уровня (показанному на рис. 1 наклоненной штриховкой).

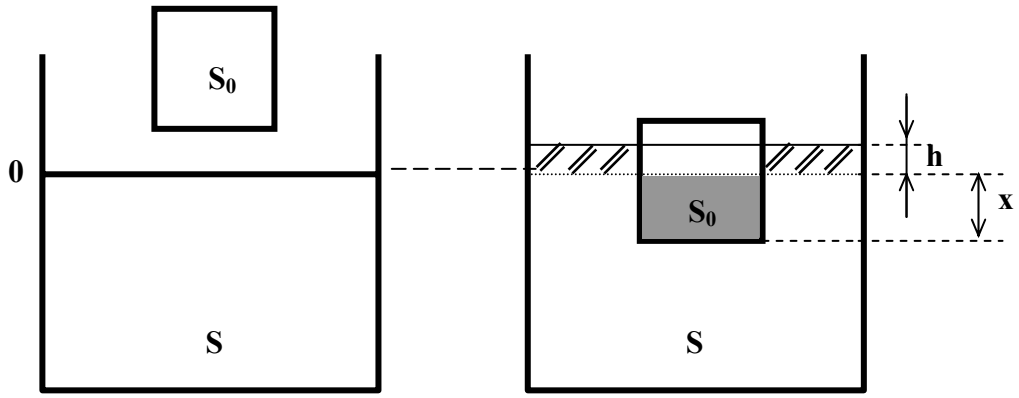

Рис. 1

Поэтому имеем: $\mathbf{S_0} \cdot x = \left(\mathbf{S} - \mathbf{S_0}\right) \cdot \boldsymbol{h}$. (1)

По закону Архимеда выталкивающая сила, действующая на брусок, определяется объемом его погруженной части, поэтому в равновесии:

$$\rho \cdot \mathbf{S_0} \cdot (x + \boldsymbol{h}) = m, \tag{2}$$

где ρ — плотность воды. С помощью формулы (1) соотношение (2) переписывается в виде

$$\rho \mathbf{S} \boldsymbol{h} = m, \tag{3}$$

откуда для изменения уровня воды h находим

$$\boldsymbol{h} = \frac{m}{\rho \mathrm{S}}. \tag{4}$$

Следует обратить внимание учащихся на то, что геометрические размеры бруска не входят в ответ. Это обстоятельство может послужить побудительным мотивом для поиска иного пути решения задачи. Если предположить, что сосуд с водой и брусок стоят на весах, то при помещении бруска в воду показания весов не должны измениться, поскольку они пропорциональны общей массе всех фигурирующих в задаче объектов. Но плавающий в воде деревянный брусок сам не давит на чашку весов, следовательно, теперь вместо силы давления бруска на чашу весов действует добавочная сила давления воды на дно сосуда, возникшая за счет изменения ее уровня. Отсюда немедленно следует соотношение (3), а соотношения (1) и (2) при таком решении задачи вообще не фигурируют. Найденный подход к решению этой задачи сразу открывает возможность решения ряда других, более сложных, задач, в которых непосредственное вычисление сил давления жидкости на дно и стенки сосуда недоступно учащимся основной школы вследствие возникающих математических трудностей. Серия таких задач рассматривается в работе [1]. Подчеркнем, что парадоксальный, на

первый взгляд, ход в условиях, когда с принципиальной физической точки зрения все уже ясно, требует преодоления определенной психологической трудности в сознании учащихся. Неожиданная возможность не только с новой точки зрения взглянуть на уже понятную с точки зрения физики ситуацию, но и существенно при этом упростить вычисления создает хороший задел для попыток совершения подобных действий при решении других задач.

Чтобы как можно раньше включать учащихся в активную творческую деятельность с целью формирования и развития их творческих способностей и мышления, освоения ими азов методологии творческого поиска, необходимо иметь соответствующий учебно-методический материал [13]. При обучении учащихся явному или неявному использованию принципа толерантности очень важно начинать это обучение с таких задач, при решении которых различные подходы являются равноценными, т. е. при использовании любого из них решение задачи может быть доведено до конца. Тем самым действие принципа толерантности проявляется в полном объеме: любой из используемых подходов способен привести к полному (качественному и количественному) описанию рассматриваемого явления. Только после этого можно переходить к задачам, в которых использование какого-либо определенного подхода дает преимущества для получения полного ответа задачи, хотя в принципиальном плане понятно, что и другие подходы позволяют достичь нужной цели после преодоления определенных математических трудностей. В связи с этим обучение применению принципа толерантности при решении гидростатических задач целесообразно начинать именно с приведенного выше примера и только потом переходить к циклу задач, представленному в работе [1].

Использование принципа толерантности при решении задач по механике, которое достаточно подробно изложено в работах [1, 9], в основном ориентировано на поиск математического аппарата, позволяющего обойти вычислительные трудности, возникающие при решении ряда задач. Наиболее ярким примером здесь является поиск геометрических образов векторных уравнений кинематики, динамики и статики, что позволяет использовать простые геометрические соображения вместо громоздких аналитических преобразований.

Однако можно выделить еще один аспект проявления принципа толерантности, при котором в качестве «рабочего» материала часто выступают другие, «конкретные» (симметрия, относительность) методологические принципы физики, позволяющие фактически осуществлять необходимые действия для анализа физического явления.

Для примера приведем следующую з а д а ч у : *на гладкой горизонтальной поверхности около стены стоит однородный брусок массой M с углублением цилиндрической формы радиусом* **R** *(рис. 2). Из точки* **A** *без трения и начальной скорости соскальзывает маленькая шайба массой* **m**. *Какова максимальная скорость бруска при его последующем движении?*

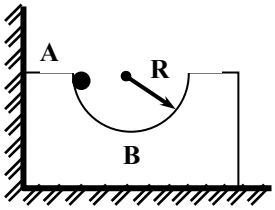

Рис. 2

Традиционное решение задачи начинается с анализа физической ситуации и осознания того факта, что скорость бруска относительно земли будет максимальной в момент второго прохождения шайбой точки **B**. Применим фундаментальные законы — законы сохранения механи-

ческой энергии и импульса для первого и второго моментов прохождения шайбой точки **B**:

$$\frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv^2}{2} + \frac{Mu^2}{2}, \qquad (5)$$

$$mv_0 = mv + Mu,$$

или в проекции на направление движения бруска:

$$mv_0 = Mu - mv, \qquad (6)$$

где v_0 — скорость шайбы относительно земли в момент первого прохождения точки **B**, равная $\sqrt{2gR}$, v — скорость шайбы относительно земли при втором прохождении точки **B**, u — искомая скорость бруска (рис. 3).

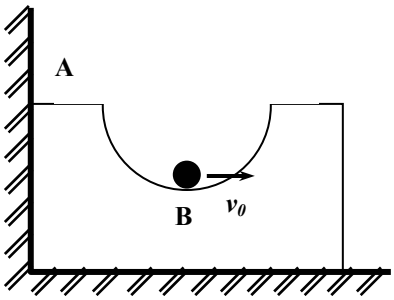

Рис. 3. Первый момент прохождения шайбы через точку **B**

Решение полученной системы уравнений дает результат:

$$u = \frac{2m\sqrt{2gR}}{m+M}. \qquad (7)$$

Принцип толерантности заставляет задуматься о возможности другого подхода к рассмотрению физической ситуации задачи с использованием принципа относительности. На первый взгляд, классическим законом сложения скоростей в данном случае воспользоваться нельзя, так как система отсчета, связанная с бруском, является неинерциальной. Однако при внимательном анализе физической ситуации можно отметить следующие тонкие обстоятельства.

Во-первых, в первый и второй моменты прохождения шайбой точки **B** система отсчета, связанная с бруском, инерциальна, а следовательно, можно записать соотношение скоростей:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u},$$

или в проекции на направление движения бруска:

$$-v = -v' + u,$$

где v' — скорость шайбы относительно бруска во второй момент прохождения ею точки **B** (рис. 4).

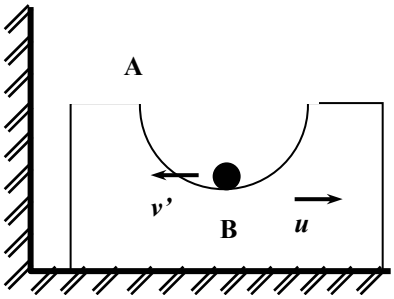

Рис. 4. Второй момент прохождения шайбы через точку **B**

Во-вторых, отсутствие трения между шайбой и бруском позволяет сделать вывод, что скорости шайбы относительно бруска в первый и второй моменты прохождения точки **B** будут одинаковыми: $v' = v_0$, а значит, для скорости v получается соотношение $v = u - v_0$, подставляя которое в выражение закона сохранения энергии (5), получаем:

$$\frac{mv_0^2}{2} = \frac{m\left(u - v_0\right)^2}{2} + \frac{Mu^2}{2},$$

откуда сразу же следует ответ (7).

Таким образом, применение принципа толерантности в таком ключе стимулирует развитие глубокого физического понимания, заставляя подмечать тонкие нюансы физического явления.

При изучении электродинамики в курсе физики средней школы принцип толерантности обычно практически не используется, за исключением указания того факта, что в электростатике силу взаимодействия двух электрических зарядов можно определять либо с помощью закона Кулона, либо используя понятие электрического поля, создаваемого неподвижными зарядами.

Обучение использованию принципа толерантности при изучении этого раздела целесообразно начать с анализа вопроса, по поводу которого, как показывает опыт, у подавляющего большинства учащихся существует твердое убеждение, что расчет теплового действия электрического тока всегда проводится с помощью закона Джоуля—Ленца. Поэтому установление возможности иного подхода к анализу данного вопроса выступает как сильный психологический фактор, который указывает на принципиальную возможность в ряде случаев обойтись без использования частного физического закона, описывающего конкретное явление. В данном случае — закона Джоуля—Ленца: в действительности часто нет необходимости в знании конкретных количественных характеристик теплового действия электрического тока, достаточно только знать, что такое действие реально существует. Задачи, позволяющие проводить рассмотрение данного вопроса, представлены в работе [8]. Остановимся на методике анализа одной из них.

Соленоид, содержащий n витков медной проволоки с поперечным сечением S, помещен в однородное магнитное поле, линии индукции которого параллельны оси соленоида. Индукция магнитного поля B равномерно изменяется со временем с заданной скоростью ΔB/Δt. Определите тепловую мощность, развиваемую в соленоиде, концы которого замкнуты накоротко, если диаметр соленоида равен D.

Стандартное решение этой задачи, основанное на использовании закона Джоуля—Ленца, обычно не вызывает затруднения у учащихся. Возникающая в соленоиде ЭДС индукции, равная по закону Фарадея $-n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, приводит к возникновению электрического тока I в проводнике с сопротивлением $R = \frac{n\rho\pi D}{S}$ (ρ — удельное сопротивление медной проволоки). В результате в соответствии с законом Джоуля—Ленца для количества теплоты *P*, выделяющейся в единицу времени, находим

$$P = I^2 R = n\pi \frac{D^3 S}{16\rho}\left(\frac{\Delta B}{\Delta t}\right)^2. \qquad (8)$$

При решении этой задачи без использования закона Джоуля—Ленца приходится апеллировать к фундаментальному физическому закону — закону сохранения энергии — и детально анализировать все происходящие в рассматриваемой системе энергетические превращения. При изменении магнитного потока ΔФ, пронизывающего каждый виток, в электрической цепи совершается работа, равная $-I \cdot \Delta\Phi$. В соленоиде с n витками совершаемая работа будет в n раз больше, и развиваемая мощность будет даваться тем же самым выражением (8). Теперь остается только понять, что при отсутствии процессов, при которых энергия могла бы переходить в другие формы (например, в кинетическую энергию стягиваемых витков провода при возможности их движения), вся развиваемая мощность будет реализовываться в виде выделяющейся теплоты.

Усвоение подхода, опирающегося на принцип толерантности, сопровождается развитием более глубокого понимания соотношения между частными и общими фундаментальными законами физики и создает хорошую психологическую основу для развития умения анализировать ситуации, для которых не известны описывающие их частные физические законы.

Некоторые другие аспекты использования принципа толерантности при изучении электродинамики и оптики, изложенные в явном и неявном виде в работах [1, 9], позволяют сделать вывод о том, что диапазон действия этого принципа расширяется по мере изучения более сложных разделов физики и соответственно возрастают его возможности в решении педагогических задач, стоящих перед школьным физическим образованием.

Использование принципа толерантности при изучении термодинамики и молекулярной физики заслуживает особого внимания и будет предметом отдельного исследования. Здесь только отметим, что его роль и уровень применения зависят от последовательности изучения разделов «Термодинамика» и «Электродинамика» в школах и классах различного профиля [12].

Особую роль играет принцип толерантности при изучении основ современной физики, в частности, квантовой теории. Наиболее трудный в психологическом отношении момент заключается в осознании того факта, что корпускулярные и волновые представления о природе микрообъектов, взаимоисключающие друг друга в классической физике, здесь сводятся воедино, и именно их соединение позволяет создать внутренне непротиворечивую теорию, способную объяснить все многообразие свойств микромира. С одной стороны, внутреннее принятие учащимся возможности различных подходов к описанию явления, казалось бы, должно способствовать более легкому усвоению им идеи корпускулярно-волнового дуализма. Но, с другой стороны, все не так просто, потому что корпускулярная и волновая картины явления здесь выступают не в виде различных способов его описания, а соответствуют потенциальной возможности проявления как корпускулярных, так и волновых свойств в рамках одного определенного подхода к описанию явления в зависимости от проводимого эксперимента.

В данном случае принцип толерантности проявляется в возможности использования и соотношений неопределенностей Гейзенберга, и представления о волнах де Бройля, представляющих альтернативный язык для описания квантовых явлений. Циклы задач, посвященных обсуждаемому вопросу, содержатся в работах [1, 12].

Следует подчеркнуть, что использование указанных альтернативных подходов, строго говоря, соответствует различающимся между собой физическим моделям квантовых явлений. Так, например, оценка численных значений размера атома и его энергии в основном состоянии на базе соотношений неопределенностей проводится без конкретизации описания поведения электрона в атоме, в то время как та же оценка с помощью понятия о волнах де Бройля основана на картине стоячих волн для атома [1]. Черты парадоксальности физического мышления, выработанные у учащихся ранее при использовании принципа толерантности в процессе изучения разделов классической физики, в немалой степени будут способствовать осмыслению и усвоению сложных представлений квантовой физики.

Несмотря на кажущуюся менее выразительную роль принципа толерантности в плане поиска более простого математического аппарата по сравнению с возможностью описания явлений при отсутствии знания о частных физических законах, именно эта его сторона может оказаться очень эффективной при решении задач, посвященных релятивистским эффектам [12]. Здесь речь идет об осознанном выборе между двумя формами представления фундаментальных положений специальной теории относительности:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad p = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \tag{9}$$

или

$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4, \qquad \vec{p} = \frac{E}{c^2}\vec{v} \tag{10}$$

В учебном пособии [12] приведено большое количество задач, решение которых оказывается весьма компактным или, напротив, весьма громоздким, в зависимости от удачного или неудачного выбора между соотношениями (9) и (10). Исключительно плодотворной оказывается при этом и вторая функция принципа толерантности. В ряде задач (например, №7 из работы [7. С. 89], см. также работу [1. С. 167]) использование этого принципа приводит не только к получению ответа на вопрос задачи, но и к установлению точных принципиальных соотношений, которые приходится задавать в условии задачи при ее решении «в лоб» без обращения к принципу толерантности.

В заключение остановимся на роли принципа толерантности при таком подходе к решению физических задач, при котором акцентируется внимание на построении физической и математической моделей рассматриваемого явления и выяснения условий, при которых возможно его экспериментальное наблюдение [8]. При таком подходе в определенном смысле стирается или, по крайней мере, размывается грань между «правильными» и «неправильными» суждениями. Речь, разумеется, идет не о грубых ошибках, свидетельствующих о нарушении в рассуждениях фундаментальных физических законов, а о положениях, формулируемых при анализе различных возможных моделей явления в их иерархической цепочке. Именно здесь в полной мере проявляется действие принципа толерант-

ности, когда положения, справедливые в рамках одной модели, оказываются неадекватными в рамках другой, более реалистической модели, учитывающей новые факторы, характеризующие протекание рассматриваемого явления.

В качестве примера можно привести задачи № 20 и № 21 из работы [8]. Полученный в «упрощенной» задаче № 21 ответ является формально (в соответствии с условием задачи) правильным, хотя он соответствует неустойчивому равновесию. В то же время ответ в более общей задаче № 20 содержит все предельные случаи, но получение этого ответа требует рассмотрения новых, отсутствующих в задаче № 21 факторов. Здесь естественным образом возникает серьезная проблема, связанная с самой формулировкой физических задач, но рассмотрение этого вопроса составит предмет отдельного исследования.

Подводя итог, можно констатировать, что последовательное использование принципа толерантности при изучении классических разделов физики в средней школе позволяет развивать физическое мышление обучаемых в направлении выработки ряда парадоксальных черт, основными из которых являются: 1) психологическая готовность (а в идеале — и потребность!) к поиску различных подходов, обеспечивающих возможность преодоления возникающих математических трудностей при использовании одной и той же физической модели явления; 2) уверенность в возможности проводить строгое рассмотрение реальных явлений в условиях, когда не известны описывающие их частные физические законы, за счет обращения к другой, видоизмененной физической модели. Достаточно уверенное владение учащимися принципом толерантности и психологическая готовность к его использованию в конкретных случаях позволяют говорить о более высоком уровне их методологической образованности по сравнению со случаем, когда они владеют только умениями использовать «конкретные» методологические принципы физики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. *Кондратьев А. С., Ситнова Е. В.* Парадоксальность физического мышления. СПб., 2007.

2. *Фейнман Р.* Характер физических законов. М., 1987.

3. *Самарский А. А.* Неизбежность новой методологии. Математика и методологическое обоснование науки // Коммунист. 1989. № 1.

4. *Kadanoff L. P.* Greats // Physics today. 1994. № 4. P. 9–11.

5. *Бутиков Е. И., Быков А. А., Кондратьев А. С.* Физика в примерах и задачах: Учеб. пособие. 3-е изд. М., 1989.

6. *Кондратьев А. С.* Физические задачи в системе школьного образования // Тезисы докладов на Всесоюзной научно-методической конференции ФССО-91. Л., 1991. С. 3–4.

7. *Кондратьев А. С., Лаптев В. В.* Задачи по физике. Оптика. Релятивистская и квантовая физика: Учеб. пособие. СПб., 1996.

8. *Кондратьев А. С., Филиппов М. Э.* Физические задачи и математическое моделирование реальных процессов: Учебно-методическое пособие для учителя. СПб., 2001.

9. *Кондратьев А. С., Прияткин Н. А.* Современные технологии обучения физике: Учеб. пособие. СПб., 2006.

10. *Бордовский Г. А., Кондратьев А. С., Чоудери А. Д. Р.* Физические основы математического моделирования: Учеб. пособие для вузов. М., 2005.

11. Интервью с академиком В. П. Масловым // Квант. 1988. № 5. С. 14–15.

12. *Бутиков Е. И., Кондратьев А. С., Ляпцев А. В., Уздин В. М.* Физика для углубленного изучения: Т. 1 «Механика»; Т. 2 «Электродинамика и оптика»; Т. 3 «Строение и свойства вещества»; Т. 4 «Задачи по физике»; Т. 5 «Задачи на компьютере». М., 2004–2008.

13. *Ларченкова Л. А.* Психолого-педагогические проблемы обучения моделированию реальных процессов // Физика в системе современного образования (ФССО-07): Труды Девятой международной конференции. Т. 2. СПб., 2007.