

Общие принципы решения физических задач (десять заповедей)

В.И.Николаев

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет

Обсуждаются общие принципы, на которых строится решение физической задачи. Развивается идея о том, что в своей совокупности эти принципы дают системную основу для анализа ситуаций, в которых законы физики выступают в роли главного средства достижения поставленной цели. Обращается внимание на методические особенности использования этих принципов в ходе учебных занятий по общему курсу физики. Все основные утверждения иллюстрируются примерами.

На страницах журнала «Физическое образование в вузах» довольно часто обсуждаются вопросы методики преподавания физики. Среди этих вопросов встречается немало таких, которые подсказаны самой практикой преподавания. К их числу относятся и вопросы методики решения физических задач.

Сама жизнь вынуждает нас вновь и вновь обращаться к этой проблематике, заставляя в меняющихся условиях искать устойчивые ориентиры при выборе вариантов действий. Ведь физические задачи, прежде всего учебные, – великолепный полигон, на котором можно учиться умению оценивать ситуацию и принимать решение, сообразуясь с обстоятельствами. Как хорошо, что тем, кто изучает общий курс физики, приходится решать довольно много задач по изучаемым разделам курса!

Решение задач – неотъемлемая часть всего многопланового процесса изучения основ физики. С их помощью учащиеся постигают премудрости физической науки, применяют положения теории для анализа конкретных ситуаций, учатся логически рассуждать, преодолевая возникающие трудности, избавляются от заблуждений (которых особенно много именно при первом серьезном изучении основ физики). При этом они еще и приобретают новые привычки, в добавление к уже имеющимся, – хорошие и плохие.

Как помочь учащимся в формировании полезных привычек – таких, которые могли бы обеспечить им успех в занятиях физикой, а вместе с этим успехом, что тоже немаловажно, – и растущую уверенность в своих силах и возможностях? Как уберечь их от соблазна рассматривать каждую очередную «задачу по физике» как задачу на сообразительность?

Многое в этом зависит от преподавателя, который, имея возможность повлиять на ход мыслей учащихся, ненавязчиво, казалось бы, но довольно настойчиво, раз за разом повторяет негромко одни и те же истины – те самые, на которые можно опереться не только в простых типовых случаях, но и при решении трудных задач.

По глубокому убеждению автора, в роли таких истин могут выступать прежде всего формулировки общих принципов решения физических задач. Правда, надо сделать существенную оговорку: эти формулировки должны быть понятными учащимся и, по возможности, короткими.

В связи с возможными поисками таких формулировок в имеющейся литературе хотелось бы предупредить читателя в очередной раз: удивительное – рядом. А именно: как это ни удивительно, в учебниках и пособиях по общему курсу физики таких формулировок попросту нет. В лучшем случае можно

отыскать разрозненные рассуждения на эту тему, не понуждающие учащихся к каким-либо конкретным действиям. А ведь между тем сами собой напрашиваются сразу два немаловажных вопроса: о чем эти принципы и сколько их всего?

Автор этой статьи предпринял попытку собрать воедино утверждения, которые имеют смысл общих принципов решения физических задач. Приводимые ниже формулировки этих принципов прошли апробацию и жесткий отбор на учебных занятиях по общему курсу физики на физическом факультете МГУ. В итоге этих принципов оказалось ровно десять.

Чтобы не было недоразумения, еще раз оговоримся: речь пойдет дальше именно об учебных физических задачах. «За бортом» разговора остаются, таким образом, очень важные и интересные аспекты проблемы, связанные с поиском нестандартных путей при решении задач, с элементами творчества, с ролью аналогий и многое другое. Кроме того, внесем определенность в терминологию, связанную с главным предметом разговора: принцип, или заповедь, – это правило, основное положение, руководящая идея (см., например, [1]).

Итак, вот эти принципы (с краткими комментариями).

1. В основе методов решения физических задач – физические законы.

Это утверждение не случайно занимает первое место: ведь в физике нет ничего важнее физических законов. С них все начинается – с их формулировок и уяснения их смысла. Словесных версий формулировок законов – великое множество в книгах. Приходится выбирать, а при этом – быть разборчивым. Как ни привлекательны краткие формулировки, от многих из них приходится отказаться ввиду их непригодности. Вот, например, одна из распространенных версий третьего закона Ньютона: «Действие равно противодействию». Да это просто неправда! Можно привести множество простых примеров, в которых действие не равно противодействию! Вспомним заодно правильную формулировку третьего закона Ньютона. В ней пять утверждений: 1) силы в природе возникают парами (иначе говоря, это силы взаимодействия, а значит, приложены к двум разным телам), 2) эти силы равны по величине, 3) противоположны по направлению, 4) действуют вдоль одной прямой, 5) имеют одинаковую природу. Другой пример ошибочной формулировки – закона сохранения механической энергии: «Полная механическая энергия изолированной, или замкнутой, системы тел остается постоянной при любых взаимодействиях между телами системы». Эту фразу из года в год настойчиво повторяют на вступительных экзаменах по физике все новые и новые поколения абитуриентов, которые, судя по всему, хорошо учили уроки в школе. Мало того, что в приведенной фразе не делается различий между изолированной и замкнутой системами тел. В ней еще и утверждается фактически, что наличие сил трения между телами системы не мешает сохранению ее полной механической энергии! Приведенные два примера иллюстрируют простую истину: прежде чем применять тот или иной физический закон при решении задачи, действительно надо сначала разобраться в его смысле. К сказанному выше о физических законах добавим еще, что бывают случаи, когда утверждение, имеющее смысл закона, традиционно законом не называется. Так обстоит дело, например, с одним из трех основных законов электростатики: это – принцип суперпозиции.

2. Всякая физическая задача может быть решена только лишь в рамках некоторой выбранной абстрактной модели.

В каждом конкретном случае решение задачи начинается именно с выбора абстрактной модели, в рамках которой будет затем проводиться рассмотрение тех условий, в которых находится изучаемая система тел. Это – самый ответственный этап решения задачи. От того, как именно выбрана абстрактная модель, зависит не только результат решения, но и сама возможность решить задачу и получить ответ на поставленный вопрос. В ходе решения невозможно учесть все реальное многообразие факторов, от которых, в той или иной степени, зависит «судьба» системы. Да в этом и нет необходимости: ведь всегда бывает так, что какие-то факторы (особенности, обстоятельства, свойства) представляются нам важными, а какие-то – второстепенными. Вот мы и выбираем нечто абстрактное (то, чего на самом деле нет) взамен реального (того, что есть в действительности). Но есть и другая сторона дела. Выбирая модель на этом самом первом этапе решения, надо позаботиться о том, чтобы на последующих этапах задача оказалась разрешимой. Иначе говоря, выбор модели должен быть таким, чтобы далее в ходе решения не встретилось непреодолимых трудностей – ни физического, ни математического характера. При выборе модели надо использовать накопленный опыт – свой (если он есть) и чужой. Как жаль, что авторы практически всех используемых сейчас задачников по физике, по существу, отнимают у тех, кто решает задачи, саму возможность научиться самому выбирать абстрактную модель! Как часто приходится читать в условиях задач приказания типа: «нить считать невесомой и нерастяжимой», «трением пренебречь», «Землю считать однородным шаром», «амперметр считать идеальным», «краевыми эффектами пренебречь» и т.д. Скажите, как в таких условиях научиться иметь свое мнение?

3. Математика при решении физических задач играет роль инструмента исследования.

А ведь и действительно: без математики в физике и шагу не сделаешь! Физика и математика сопутствуют друг другу – и в учебе, и в науке, и в жизни. Значит, надо научиться владеть этим инструментом – математикой. О ней мы должны вспоминать уже на самом первом этапе решения физической задачи – при выборе абстрактной модели. Нам приходится выбирать модель с таким расчетом, чтобы на последующих этапах решения не встретилось непреодолимых препятствий, связанных с математикой. По мере освоения все новых и новых разделов математики мы получаем возможность выбирать все более сложную модель для решения. Примером такого подхода может служить задача о колебаниях пружинного маятника. В общем курсе физики ее рассматривают (и решают каждый раз заново), продвигаясь по схеме «от простого к сложному», постепенно усложняя выбираемую абстрактную модель. Сначала рассматриваемая колебательная система – это материальная точка, укрепленная на невесомой пружине; внешние силы в направлении движения точки отсутствуют, а ее смещение из положения равновесия достаточно мало (с тем, чтобы можно было использовать закон Гука). Затем, усложняя модель и делая ее несколько более реалистичной, добавляют силу сопротивления среды, считая эту силу (опять-таки ради простоты) пропорциональной скорости точки. Следующие шаги на пути усложнения модели (они делают модель все более и более соответствующей реальной действительности) связаны с добавлением

внешней силы, действующей на материальную точку, – все по той же схеме «от простого к сложному»: внешняя сила меняется с течением времени по гармоническому закону, по произвольному периодическому закону, по произвольному закону.

4. Решение всякой физической задачи справедливо, строго говоря, в рамках выбранной системы отсчета.

Наиболее яркая, пожалуй, иллюстрация к этому тезису – сам факт существования теории относительности. В случае движения тел со скоростями, сравнимыми со скоростью света, результат решения может оказаться совершенно различным в разных системах отсчета – и по форме, и по своему содержанию. Но и в рамках классической физики есть немало случаев, когда, решая задачу, надо внимательно следить за тем, как ведут себя составные части рассматриваемой системы тел. В качестве примера можно указать задачи, в которых встречаются силы инерции. Обратимся и к другим учебным аспектам этого вопроса. Выбирая систему отсчета, мы должны представлять себе, что это означает. А потому, обсуждая этот очередной принцип, зададимся вопросом: что такое система отсчета? Очень часто приходится слышать ответ: «Система отсчета – это ”система координат + часы”». Отвечая таким образом, учащиеся упускают из виду, что система координат, не связанная ни с каким из тел, – это нонсенс. Если она покоится, то неясно – относительно чего. Если движется, то непонятно – вместе с какими телами и как. Эту неопределенность устраняют, вводя в рассмотрение «тело отсчета». А теперь правильный ответ на поставленный вопрос: «Система отсчета – это ”система координат (вместе с телом отсчета) + часы”». Выбрав систему отсчета в ходе решения задачи (вслед за выбором абстрактной модели), желательно нарисовать ее на чертеже. Телом отсчета могут служить, например, фрагмент потолка лаборатории или стол, выделенные штриховкой, а система координат должна быть недвусмысленно связана на чертеже с телом отсчета.

5. Критерием правильности решения физической задачи является, в конечном итоге, опыт.

А разве не так? Ведь физика – наука экспериментальная! Разумеется, нельзя понимать этот очередной принцип в том смысле, что за решением любой физической задачи должен последовать, рано или поздно, эксперимент по проверке полученного результата. Скорее наоборот: вся совокупность известных нам экспериментальных данных, включая и наш житейский опыт, может служить подсказкой в ходе всего решения задачи и прежде всего на самом первом этапе решения – при выборе абстрактной модели. От нас, решающих задачу, от нашей аргументации и компетентности зависит, например, выбор одной версии из трех – считать соударение тел абсолютно упругим, абсолютно неупругим или же ни тем, ни другим. Важно еще, с какой точностью должен быть получен численный результат. Если точность измерительных приборов сравнительно невелика, то и модель можно выбрать попроще (считая, например, тела системы абсолютно твердыми). Но бывает и так, что надо вычислить ничтожно малый эффект, зная наперед, что его, возможно, удастся измерить. Так, в известном опыте Паунда и Ребки по проверке в лабораторных условиях предсказаний общей теории относительности величина гравитационного сдвига частоты спектральной линии $\Delta\nu/\nu_0 = -gh/c^2$, вычисленная до проведения эксперимента, составляла

$\sim 10^{-15}$ (g – ускорение свободного падения, h – перепад высот по вертикали, c – скорость света) [2, 3].

6. «Каждое слово должно иметь смысл», – гласит китайская мудрость.

В этой фразе, если рассматривать ее в контексте разговора об общих принципах решения физических задач, легко угадывается призыв отнестись с уважением и вниманием к формированию понятийного аппарата в физике. Всегда ли мы внимательны к терминологии? Пожалуй, не всегда, даже далеко не всегда. Если мы плохо знаем терминологию, то можем наделать ошибок, а за ними могут последовать пренеприятные события. Одними извинениями тут не обойдешься. Если мы плохо владеем языком науки, то будем воспринимать смысл получаемого задания на уровне собственного мнения. Так ведь можно решить совсем «не ту» задачу. Есть, однако, выход из этой ситуации. Это – как профилактика от всех бед, связанных с терминологией. Выход довольно примитивный, зато доступный для всех, а потому радикальный: надо «всего лишь» учить различные (и многочисленные!) формулировки, начиная с определений понятий и физических величин. За ними (а лучше сказать, вместе с ними) должны последовать законы, теоремы, следствия, знаменитые и просто полезные фразы. Любого, кто этим занимается, ждет на этом поприще великое множество открытий. Обнаружится, например, что у целого ряда величин имеется сразу несколько названий. Так, в разделе «Колебания и волны» есть величина, обозначаемая традиционно греческой буквой ω . У нее сразу четыре названия: «угловая частота», «круговая частота», «циклическая частота» и ... «частота ω ». Еще непременно обнаружится, что авторы учебных книг по физике никак не договорятся между собой, следует ли различать по смыслу два употребительных термина – «изолированная система тел» и «замкнутая система тел». Между прочим, если отождествлять их, считая синонимами, то это сильно обедняет формулировки законов сохранения в «Механике». Или вот еще вопрос по терминологии раздела «Электричество», важный в связи с применением законов физики в повседневной практике (в том числе в технике безопасности): есть ли различия в смысле терминов «напряжение», «падение напряжения», «потенциал», «разность потенциалов»?

7. В исходной системе уравнений каждое уравнение должно иметь свое название.

И действительно: решая задачу, надо осознавать, что делаешь, и ... «называть вещи своими именами». Это способствует формированию системного подхода к решению задач (а вместе с ними – и к оценке жизненных ситуаций). Исходная система уравнений формируется, как известно, на основе физических законов и соответствующих им уравнений и формул. В связи с вопросом о названиях проще всего обстоит дело с законами – у них, как правило, есть устоявшиеся, привычные, знакомые названия. Например: «закон всемирного тяготения», «закон Гука», «закон Дюлонга – Пти», «закон Кулона», «закон Ома», «закон Ампера», «закон Стефана – Больцмана». Нередко взамен слова «закон» используется другой термин, хотя по смыслу имеется в виду закон: «первое начало термодинамики», «принцип суперпозиции полей», «первое правило Кирхгофа». Есть и множество знаменитых уравнений и формул. Вот примеры соответствующих названий: «уравнение движения», «уравнение моментов», «формула Стокса», «барометрическая формула», «уравнение Бернулли», «волновое уравнение», «уравнение адиабаты»,

«уравнение Ван-дер-Ваальса», «уравнение диффузии», «распределение Максвелла», «формула линзы», «условие главного интерференционного максимума». А как быть в тех случаях, когда записанное равенство не имеет устоявшегося названия? Приходится подыскивать слова, соответствующие смыслу этого равенства. Можно исходить из того, что равенство, которое требуется как-то назвать, сообразуясь с обстоятельствами, надо сначала обосновать и только потом включать в формируемую систему уравнений. А вот, значит, и его название – довольно-таки общее: «ранее доказанное утверждение». Приведем два примера. В задаче о машине Атвуда из раздела «Механика» встречается равенство $T_1 = T_2$, включаемое в так называемую исходную систему уравнений [4]. Смысл его в том, что натяжение на концах нити, перекинутой через блок, одинаково. Разумеется, оно сначала должно быть доказано, как теорема. Вот и получается, что это – «ранее доказанное утверждение». Но можно назвать и по-другому: «следствие выбранных модельных предположений». Второй пример относится к разделу «Молекулярная физика». В ряде случаев при решении задач полезной оказывается следующая «рабочая формула» (кстати, это тоже название!): $nk/2 = \rho c_v$. Здесь n – число молекул газа в единице объема, i – число степеней свободы молекулы, ρ – плотность газа, c_v – его удельная теплоемкость при постоянном объеме, k – константа Больцмана. Эта формула, вовсе не знаменитая, а именно «рабочая», – тоже пример «ранее доказанного утверждения». Она – следствие гипотезы Больцмана о равномерном распределении и определении теплоемкости вещества.

8. Сначала – система уравнений, потом – решение.

На вступительных экзаменах по физике, в том числе и в форме так называемого ЕГЭ, хорошо бывает видно, что у большинства выпускников средней школы нет привычки, решая задачу, начинать с составления системы уравнений. Почти всегда сразу идут выкладки, как если бы надо было выкрутиться из ситуации, в которую попал абитуриент, вытащив доставшийся ему экзаменационный билет. Обычно бывает так, что уже в первое записанное уравнение сразу подставляются численные значения величин, вследствие чего утрачивается логика рассуждений, а процесс решения задачи напоминает случайные блуждания в мире символов и чисел. Успешно сдав вступительные экзамены, те, кто получает статус студента, «лучшие из лучших», в ходе учебы в вузе с большой неохотой расстаются с этими своими привычками. Тем ответственнее миссия преподавателя, который должен убедить студентов в целесообразности и эффективности системного подхода к решению задач. Этот подход, при котором сначала записываются в виде уравнений основные утверждения, и только потом следует фаза преобразований этих уравнений с подстановкой численных значений величин, обеспечивает, помимо логичности рассуждений, целый ряд других удобств. Решающий задачу может, контролируя свои действия, спросить себя: «Как называется каждое из записанных уравнений?» Он может сосчитать число уравнений и число входящих в них неизвестных величин, что немаловажно для дальнейших его действий. Может увидеть, какие из величин, входящих в исходную систему уравнений, выступают в роли «параметров задачи», а какие – в роли констант. Судя по виду уравнений и сопоставляя их, можно выбрать удобный алгоритм математических преобразований, приводящих к искомому результату.

9. В физике сравнивают величины одинаковой размерности.

В этой фразе – напоминание об одном из важнейших правил в физике: о правиле размерностей. Это правило – еще один ресурс при решении задач. Помнить о нем (и применять его) следует прежде всего в начале решения задачи при записи исходных уравнений и в самом конце, когда получен так называемый «ответ». В простейшем и самом употребительном варианте это правило выглядит так: «Размерность правой части равенства должна быть такой же, какова размерность его правой части». Если в правой части равенства стоит нулевая величина, формулировку приходится изменить: «Размерность у всех складываемых величин должна быть одинаковой». Установление размерности различных комбинаций физических величин – вовсе не простая процедура. Необходимы навыки применения правила размерностей. Тому, кто решает задачу, особенно внимательным надо быть, когда встречается комбинация величин сразу из нескольких разделов физики – например, из разделов «Механика», «Термодинамика» и «Электромагнетизм». Есть и другая опасность. В физике нередко встречаются величины, сходные по смыслу, но имеющие, тем не менее, различную размерность. Например: теплоемкость, молярная теплоемкость, удельная теплоемкость. Если во-время не обратить на это внимание, можно получить «ответ» с нелепой размерностью. Особый интерес у физиков вызывают безразмерные комбинации величин, поскольку они дают большие удобства при описании состояний и поведения различных по своим свойствам систем при помощи одних и тех же уравнений. Примером такой безразмерной величины может служить число Рейнольдса. Или другой пример. При изучении магнитных фазовых переходов ввели в рассмотрение приведенную намагниченность M/M_0 и приведенную температуру T/T_C (M и M_0 – соответственно намагниченность вещества при температуре T и при абсолютном нуле температур, T_C – температура Кюри), что дало возможность унифицировать описание свойств целого класса веществ. Развивая формализм такого описания, пришли к созданию нового направления исследований в физике – теории подобия и критических явлений.

10. Последний этап решения физической задачи – анализ полученного результата.

Нередко преподаватель может наблюдать знакомую картину: закончил студент выкладки, решая задачу по физике, и сразу смотрит в «ответ», приведенный в задачнике – «Совпадает или не совпадает?» Такова привычка едва ли не у всех студентов, лишаящая их возможности научиться гораздо большему, чем они себе позволяют. Наверное, следует подсказать им при случае, как должны вести себя в подобной ситуации люди, заботливые по отношению к себе. Ведь каждый учащийся должен знать наперед, что делать ему в конце решения, когда получен так называемый «ответ». Это могут быть, например, отбор корней, рассмотрение характерных частных случаев, применение правила размерностей, общая оценка разумности полученного результата. На этом последнем этапе, как и в ходе всего решения, физика и математика сопутствуют друг другу. Но теперь главным становится физический смысл полученного результата, его интерпретация.

В заключение еще раз обратим внимание на то, что обсуждавшиеся принципы не связаны с каким-либо конкретным разделом физики или типом задач. В этом смысле они универсальны. Взятые в совокупности, эти принципы

могут уберечь от многих оплошностей и ошибок. Самое же главное в том, что общие принципы решения физических задач дают системную основу для анализа ситуаций, в которых законы физики выступают в роли главного средства достижения поставленной цели.

Литература

1. *Ожегов С.И.* Словарь русского языка. М.: Русский язык, 1978.
2. *Pound R.V., Rebka G.A.* Phys. Rev. Lett., V. 4, 1960. P. 337.
3. *Вертхейм Г.* Эффект Мессбауэра. Принципы и применения. Пер. с англ. М.: Мир, 1966, 172 с.
4. *Николаев В.И.* Задача о машине Атвуда как тест. // Физическое образование в вузах, Т. 8, № 2, 2002. С. 19-28.

Abstract

General Principles for Solution of Physical Tasks (ten Rules)

V.I.Nikolaev

M.V.Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics

Ten general principles for solution tasks on physics are discussed. The idea is founded that, being taken together, these principles create the system base for analysis of situations in which the laws of physics play the role of the main tool for achievement the required aim. Methodical aspects of using these principles in teaching process on general physics are considered. All the main statements are illustrated by examples.