

Термодинамика и Молекулярная физика  
Физические основы теории строения вещества  
(учебное пособие).

Варламов С.Д.

Пособие предназначено в первую очередь для школьников старших классов, обучающихся в физико-математических школах, и для студентов младших курсов, изучающих физику. Оно может использоваться учителями физики в качестве материала для самообразования и проведения занятий на кружках со школьниками, интересующимися физикой и готовящимися к выступлениям на олимпиадах.

Москва 2008 г.

Предисловие автора  
 Кому он нужен, этот учебник?

*Не можешь не писать – не пиши!*

*Не можешь писать – не пиши!*

*Не можешь – не пиши!*

**Александр Иванов**

(знаменитый поэт-пародист)<sup>(1)</sup>

Наверное, многие учителя и преподаватели физики хотят написать свой собственный учебник. Действительно, сколько же можно критиковать чужие! С другой стороны учебников и так наплодилось столько, что всех их не то что прочитать, а даже и купить невозможно. Сейчас на уроках физики в ходу учебники разных авторов и даже авторских коллективов. Есть среди этих учебников *хорошие* и *разные*. В большинстве, конечно, разные, потому что хорошие можно пересчитать на пальцах одной руки. Не будем говорить о разных учебниках, нельзя же начинать с грустного. Поговорим о хороших. Чем характеризуется хороший учебник? Во-первых, в нём очень мало физических ошибок. Во-вторых, этот учебник должен содержать много правильных картинок, которые создают в памяти лаконичные, яркие образы. В-третьих, хороший учебник должен быть компактным и в то же время полным. Наконец, самое главное: нужно чтобы этот учебник создавал глубокую основательную картину мира на каждом этапе ее изучения. Это предполагает, что учебник *не должен* представлять собой некий *молитвенник*, в котором пишутся правильные фразы, не подкрепленные никакими доказательствами. Каждое утверждение или упоминание о закономерности в хорошем учебнике должно быть подкреплено ссылками на результаты экспериментов, данными справочников и т.п.

И ещё одно важное качество должно быть у учебника = он должен быть *открытым* в том смысле, что в нём должны присутствовать указания на те явления, которые не объясняются в рамках принятой в учебнике глубины изложения материала. В нём должны быть ссылки на литературу, в которой можно найти ответы на вопросы, не рассматриваемые в учебнике. Изучающие физику в школе или Вузе должны видеть перспективу в процессе изучения физики.

Итак, основные требования к учебнику сформулированы! Насколько их удалось удовлетворить, судить читателям. У Вас в руках учебник (учебное пособие) по молекулярной физике и термодинамике. Предназначен он для тех, кто изучает физику или учит физику других. Это студенты младших курсов, школьники физико-математических школ, учителя физики старших классов, а возможно и Вузовские преподаватели физики.

Что хочет читатель получить от учебника? Это, естественно, зависит от его (читателя) целей. Возможно, что ученик захочет, прочитав 2–3 страницы, научиться решать задачи на определенную тему из тех, которые ему предстоит встретить на экзамене. В этом случае он может пропускать многие страницы учебника без ущерба для своих целей, изучая только то, что ему необходимо. Возможно, что преподаватель физики захочет разобраться с тем, почему стандартные формулы для зависимости давления насыщенного пара от температуры предсказывают одно, а в эксперименте наблюдаются давления, отличающиеся от предсказанного на три порядка. Тогда, может быть, потребуется «пройтись» по соответствующим страницам с карандашом и калькулятором (или с другим вычислительным устройством) и самому сравнить предсказания формул и данные справочников физических величин. Возможно, что студенту будет полезно не сразу «вгрызаться» в гранит квантовой физики, а сначала разобраться с тем, что *может* и что *не может* классическая физика в области молекулярной физики.

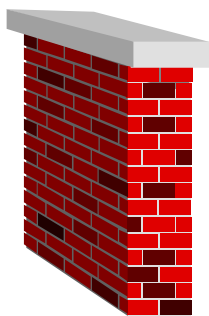
Сделаем вместе этот учебник лучше! Свои замечания и предложения направляйте, пожалуйста, в адрес редактора сайта.

С.Варламов

04 сентября 2008 г.

<sup>1</sup> Это ему принадлежит историческая фраза: «Велик могучим русских языка!»

Посвящается моему учителю, человеку, у которого около сотни псевдонимов, в частности: А.Твердов, Р.Жидков, З.Газов, А.Теплов, А.Диабатов, М.Учителев, А.Вогадров, А.Томов – Александру Рафаиловичу Зильберману.



## Введение

Никто и никогда не видел своими глазами огнедышащего дракона (<sup>2</sup>), однако легенды, картины и скульптуры с такими драконами есть в искусстве каждого народа, за исключением, пожалуй, тех, которые живут вблизи экватора. Откуда берется этот образ? Вспомните или представьте себе, как выглядит, пар вырывающийся зимой из ноздрей лошади при дыхании. Сопоставим это с нашим житейским представлением о том, что дыма без огня не бывает, – и вот вам «огонь и дым из ноздрей» чудо животного. Небольшая доля воображения и огнедышащий зверь приобретает крылья. Ещё немного напряжемся и наделим его свойством, которым человек не обладает, но очень хотел бы, – тремя головами = вот и получился Змей – Горыныч, головы которого спят по очереди. Его не застанешь врасплох.

**(Вставить смешной рисунок огнедышащего дракона)**

Это же относится и к молекулам – их поодиночке никто своими глазами не видел. Только самые крупные из них можно увидеть с помощью оптического микроскопа – это молекулы жизни – ДНК. Рассказы, картинки и многочисленные задачи о жизни молекул есть в каждом учебнике физики. В электронных учебниках есть даже мультимедийные анимации.

Однако в отличие от драконов получить достоверную информацию о молекулах можно. Она заключена в самых разных свойствах веществ и материалов, с которыми мы в жизни имеем дело. Рассказы о свойствах молекул, физические модели их взаимодействия имеют своей основой экспериментально полученные данные. При всей сложности положения «рассказчика о молекулах» в условиях, когда читатели не знают (и не обязаны знать) современной физики, ему нужно попытаться дать полную и достаточно глубокую картину, опираясь в основном на представление об устройстве нашего мира, которое дает классическая физика.

### Мир, в котором мы живем

Не должно принимать в природе иных причин сверх тех, которые истинны и достаточны для объяснения явлений

И. Ньютон

Мы живем в прекрасном и очень многообразном мире! Все, что нас окружает, то, из чего мы состоим сами, все, что происходит с нашим окружением и с нами, будет интересовать нас при изучении физики.

Почему существуют газы и твердые тела? Почему Земля покрыта океанами? Почему бывает зима и лето? Почему дуют ветры, льют дожди и идет снег? Почему греет костер и светится лампочка накаливания? Почему дым костра поднимается вверх, а утренний туман над лугом «лежит» на поверхности земли? Почему гремит гром и сверкает молния? Как работает двигатель автомобиля и как устроен внутри кристалл льда? Таких вопросов можно придумать тысячи и на них желательно иметь ответы близкие к истине.

Самое исчерпывающее и не требующее доказательств объяснение всему дает религиозное представление об устройстве Мира: например, Создатель в семь дней сотворил Мир таким, какой он есть. Спорить с людьми, которые верят, что это так, бесперспективно. Никакие доказательства им не нужны: достаточно веры. Хочется обойтись при объяснении свойств окружающего нас Мира без привлечения идеи о непознаваемых

---

<sup>2</sup> Дракон – это идеальное воплощение могущества: у него есть когти, рога и зубы, он может летать, может уничтожать врагов огнем. Дракон неуязвим, он покрыт защищающей его чешуей.

высших силах, хотя сам вопрос о возникновении Мира в любом случае останется открытым.

Области знаний об устройстве окружающего нас мира называются *естественными науками*. Существуют и "неестественные" науки: история, психология и многие другие, которые изучают человеческое общество. Естественные науки изучают Мир "с линейкой". Для множества характеристик предметов и явлений придумываются способы измерения и выражения соответствующих величин в количественном виде. Масса предмета, его линейные размеры, время, в течение которого предмет существует, – эти и многие другие характеристики допускают количественное выражение.

Что мы будем понимать под *объяснением* устройства веществ, сути явлений, свойств предметов и процессов? Как проверить, насколько глубоко наше понимание и правильно ли объяснение? Насколько близко наше знание к тому, что есть на самом деле? Человек давно искал правильные ответы на эти очень важные вопросы.

## Гипотезы и истина

Для *объяснения* того или иного явления или группы явлений используются идеи, которые может быть пока еще не получили экспериментального подтверждения, но позволяют достаточно убедительно и логически непротиворечиво построить математическую модель явления, дающую хорошие предсказания. Такие идеи называются гипотезами и иногда ждут своего экспериментального подтверждения или опровержения достаточно долго. Примером такой идеи служит гипотеза о существовании атомов, высказанная еще греческим философом Демокритом. По внешним признакам повторяемости вещей в природе, их сходности им была выдвинута гипотеза о существовании неделимых и неизменных кирпичиков, из которых составлены все предметы. Она получила свое экспериментальное подтверждение только в конце 19 века. А опровергнута идея о неизменности и неделимости атомов в начале 20 века. Эта гипотеза одновременно и *близка к истине* и в то же время *в чем-то расходится с ней*.

Идея о существовании атомов лежит в основе объяснения строения разных веществ – из атомов комбинируются молекулы. *Идеи* о существовании, движении и взаимодействии атомов и молекул лежат в основе *объяснения* устройства твердых, жидких и газообразных веществ.

## Практика и теория

Все, что мы можем увидеть, услышать и т.д. (почувствовать) - может служить для получения "информации" об окружающем нас Мире. Обнаруженные в наблюдениях закономерности обобщаются и формулируются в виде соответствующих "законов природы". Иногда такие "законы" получают имена своих первооткрывателей, например, всем известный закон Архимеда, или закон Кулона. Законы открываются людьми в самых различных областях знаний. Нас будут интересовать только законы, относящиеся к естественным наукам. Все законы имеют практическую основу – они являются обобщением опыта.

Некоторые законы позволяют выразить *соотношения* между физическими величинами, характеризующими данный тип физических явлений, в абстрактной математической форме. Например, если к электрической батарее с ЭДС 10 В и с малым внутренним сопротивлением подключить резистор с большим сопротивлением 100 Ом, то измерение электрического тока, проходящего через резистор, с помощью амперметра, близкого по свойствам к идеальному, даст результат близкий к величине 0,1 А. Между измеренными величинами  $U$ ,  $R$   $I$  при одной и той же схеме подключения имеется соотношение:  $U = RI$ . В том случае, когда не все входящие в соотношение величины известны, вместо соотношения получается *уравнение* – краткая математическая запись условия задачи о нахождении неизвестной величины. Значение неизвестной величины можно заранее

предсказать, решив соответствующее уравнение, а затем путём измерений проверить, совпало ли предсказанное *теоретически* значение с экспериментально *измеренной величиной*. Первую стадию действий – решение уравнения – можно называть прогнозом или *предсказанием*, а вторую стадию *экспериментальной проверкой* сделанного предсказания. Если в пределах точности измерений экспериментальное значение совпадает с предсказанной теоретически величиной, то можно говорить, что закон выполняется, а наша математическая модель (система уравнений) правильно описывает явление. Чем точнее предсказания, и чем шире диапазон, в котором «работает» математическая модель, тем она лучше. Вот это и есть критерий *правильности* модели.

Одновременно могут сосуществовать и конкурировать отличающиеся друг от друга теории, которые вполне удовлетворительно описывают одни и те же явления. Например, длительное время для объяснений оптических явлений применялась «корпускулярная теория света», выдвинутая Ньютоном. Одновременно для объяснения широкого круга оптических явлений использовалась «волновая теория» Гюйгенса.

На основании выдвинутых идей и математической модели (теории) предсказывается существование таких явлений, которые еще экспериментально не обнаруживались и противоречат предсказаниям другой теории, тоже претендующей на правильность своих объяснений. Вот в таком случае правильно поставленный эксперимент позволит отвергнуть не совсем правильную теорию и указать на ту теорию, которая ближе к истине. Известен пример из истории физики, когда на основании теоретических выводов было предсказано явление существования светлого пятна в середине тени предмета, закрывающего источник света. Пятно было экспериментально обнаружено, и называют его теперь «пятно Пуассона». Со временем были обнаружены факты, которые показали, что свет характеризуется дискретными свойствами, то есть энергия, импульс и момент импульса, переносимые светом, принадлежат отдельным самостоятельным сгусткам света – «квантам». Оказалось, что и волновая и корпускулярная теории света были «правы» каждая в своей области экспериментальных условий.

Например, теория Эйнштейна предсказала, что свет отклоняется при пролете вблизи массивных тел. Эксперимент, поставленный для проверки этого предсказания теории, дал результат, совпадающий с предсказанным значением угла отклонения в пределах ошибок измерений. Предсказанные теоретически физиками Глэшоу, Вайнбергом и Саламом тяжелые частицы микромира - *векторные бозоны* - были через некоторое время обнаружены экспериментально. Это триумф человеческого разума!

Кстати, если теория, которую отвергли, тоже давала хорошие предсказания в определенной области экспериментальных условий, то говорят, что более точная или более правильная теория имеет более широкую область применения. Это относится к законам механики Ньютона и теории относительности Эйнштейна. Механика Ньютона дает хорошие предсказания, если скорости движения тел значительно меньше скорости распространения света в вакууме. Теория Эйнштейна "работает" при любых скоростях движения тел.

Для объяснения того, что физические объекты имеют массу, выдвинута гипотеза о существовании особого поля – поля Хиггса, заполняющего все пространство. Кванты этого поля – бозоны Хиггса. Их до сих пор не обнаружили. Так что процесс развития физических теорий продолжается, и требуются эксперименты, которые бы позволяли проверять теории «на прочность».

## Формулы

Математическая модель, описывающая с некоторой точностью реальность, включает и некие формулы. В школе изучаются только самые простые модели, поэтому формулы «как таковые» это не самый важный вопрос. Важно (с моей точки зрения) понимать суть физического явления, и я всегда говорю ученикам, что не формулы задают вам направление мыслей, а наоборот: ваши мысли приводят к появлению нужных именно для данной задачи формул. Поэтому каждый раз, когда я слышу вопрос: «А какую формулу я

должен применить?» моя жизнь сокращается на 10 минут, как у курильщиков после одной выкуренной сигареты.

### Что нам знакомо?

Если читатель – ученик школы – взял этот учебник в тот момент, когда в соответствии с учебным планом после изучения механики положено перейти к изучению молекулярной физики и термодинамики, то, очевидно, что он уже получил достаточно сведений о физике в объеме 9–10 класса школы. Мы, естественно, предполагаем, что можно в какой-то мере опираться на полученные ранее знания. Учебник, который Вы держите в руках (или просматриваете на экране монитора), затрагивает только часть материала, изучаемого в рамках школьного курса физики. Что-то из подлежащего обсуждению уже знакомо читателям. Например, основные представления об устройстве вещества формулируются уже в учебниках 7 и 8 класса. Трудно выбрать меру опоры на знания, которые уже имеются у читателя, потому что интуиция, на которой в основном базировались полученные в «младшей школе» представления, не всегда «работает».

При изучении механики в большей степени обращалось внимание на последствия взаимодействия тел, которые связаны с изменением состояния их движения как целых предметов без рассмотрения их внутреннего устройства.

Теперь нам потребуются все приобретенные ранее знания для того, чтобы разобраться с внутренним устройством тел, а также с изменениями и превращениями этого устройства, возникающими под воздействием разнообразных внешних факторов, в частности с изменением формы тел подвергающихся механическим и тепловым воздействиям.

Внутреннее устройство тел будет изучено до определенной глубины. Мы уже слышали на уроках химии и физики, что все тела состоят из молекул, а те, в свою очередь, состоят из атомов. Нас при изучении раздела «молекулярная физика» интересует, как они взаимодействуют, и какие особенности взаимодействия молекул «отвечают» за возникновение конденсированного и газообразного вещества.

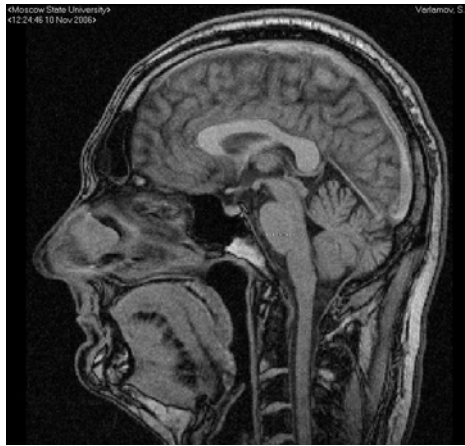
А как устроены сами атомы? Какие силы удерживают друг с другом разные атомы, и как обеспечивается стабильность самих атомов? Эти и многие другие вопросы будут рассматриваться в других разделах физики.

Мы, например, знаем, что механическое движение любого объекта характеризуется кинетической энергией всех составляющих его частей, а также потенциальной энергией, зависящей от взаимного расположения частей этого объекта. Полная кинетическая энергия этого объекта может быть представлена в виде суммы энергии движения объекта как целого (его центра масс) без учета относительного движения частей и кинетической энергии, измеренной в системе центра масс этого объекта. Если у такого объекта имеется, например, непрозрачная оболочка, то внутренние движения нам не видны, и о взаимодействии скрытых оболочкой частей объекта мы не всё знаем, но они есть, и с ними связана энергия. Такую энергию специально называют *внутренней*, чтобы подчеркнуть её скрытый от прямого наблюдения характер.

### Модели, которые мы выбираем.

Хотя мы и не имеем возможности рассматривать, то есть видеть в буквальном смысле этого слова, *отдельные* молекулы, можно по различным экспериментальным данным судить об устройстве и свойствах молекул.

Известна байка про студента, который, получив сотрясение мозга и медицинскую справку об этом событии, радостно показывал её всем подряд – «Вот! Есть!» Теперь можно к этому подойти проще: достаточно пройти обследование на томографе и получить результат в виде картинки:



- Ты видишь сурка?

- Нет!

- И я не вижу. А он есть!

### **Разговор двух натуралистов.**

Натуралисты, изучая некоторых животных, иногда подолгу не видят объекты своих интересов. Однако по различным следам, оставляемым животными, натуралисты судят об образе их жизни, о повадках, о том, чем они питаются и т.д. и т.п. Зная о поведении животных, можно создавать искусственно ситуации, в которых животные могут повести себя предсказуемым образом. Если предсказания сбываются, то это и означает, что мы поняли, как они себя ведут. Создание искусственных условий и прогнозирование реакции можно назвать экспериментальной проверкой наших представлений о том, что управляет изучаемыми нами объектами. Зная, какие повадки есть у современных животных, можно составить представление и о том, как вели себя, например, динозавры, которые сейчас на Земле уже не живут, но когда-то заселяли всю сушу, жили в морях и реках, летали по воздуху.

Объектов в окружающем нас мире много, и каждого человека есть свое собственное представление о том, как этот мир устроен. Встречающиеся нам явления настолько разнолики, что увидеть в них нечто общее представляет собой отнюдь не простую задачу. Например, мы каждый погожий день видим, что Солнце встает и, совершив свой путь по небу, садится.

Для расчетов самых разнообразных астрономических явлений Птолемею была придумана изошренная модель, в которой вокруг Земли вращается Солнце, звезды и планеты. Эта модель позволяла с большой точностью предсказывать восходы и заходы Солнца, а также Луны и других планет.

**(Вставить шуточный рисунок Солнца, Луны, Земли)**

На её основе можно было рассчитывать солнечные и лунные затмения. Если в качестве начала отсчета выбрать не Землю, а центр Солнца и направить оси координат на далёкие звезды, то движения самой Земли и других планет в этой системе отсчета выглядят проще, чем в системе Птолемея. Получается модель системы мира Коперника. Она ничем не лучше и не хуже системы Птолемея. Обе эти системы отсчёта чисто описательные – кинематические – они не вскрывают причин наблюдаемого характера относительных движений тел в пространстве.

Открытие Кеплером законов движения планет вокруг Солнца было основано на экспериментальном материале, собранном за многие годы в астрономической обсерватории Тихо Браге. Кеплер обнаружил, что все планеты движутся вокруг Солнца по орбитам близким по форме к эллипсам, и есть некоторые особенности движения, которые характерны для всех планет Солнечной системы. <sup>(3)</sup>. Этого не было в системах Птолемея

<sup>3</sup> Три закона Кеплера. Смотри механику.



и Коперника. Новая модель Кеплера гораздо лучше описывала поведение планет, чем модели, ей предшествовавшие. Но она *не вскрывала причин* такого характера движения.

Открытие Ньютоном законов механики и в том числе *закона всемирного тяготения* внесло необычайную ясность в законы движения планет, обнаруженные Кеплером. Механику Ньютона можно называть *моделью*, которая описывает взаимодействие и движение тел. Механика Ньютона позволила объяснить не только формы орбит, по которым движутся планеты, но и существование прецессии плоскости орбиты Луны с периодом 18 лет, и изменение направления оси вращения Земли с периодом примерно 20 тысяч лет. В дополнение к астрономическим явлениям механика Ньютона позволила объяснить с единых позиций такие явления на Земле как океанские и морские приливы, и даже отличие формы Земли от шара. Она настолько хорошо описывает поведение реальных объектов, что даже позволяет делать предсказания и обнаруживать то, что по невнимательности или по недостатку времени не было обнаружено раньше. На основе закона Всемирного тяготения Ньютона были вычислены координаты ранее неизвестной планеты (Нептуна), и она была обнаружена! Это открытие связано с именами Адамса и Леверье.

Однако есть астрономические явления, которые механика Ньютона (модель, описывающая поведение тел) не может объяснить. Например, планета Меркурий движется так, что большая ось его орбиты (эллипса) меняет свое положение в пространстве по отношению к далеким звездам – перигелий Меркурия смещается. Точность современных астрономических измерений настолько высока, что отклонения в предсказаниях модели Ньютона и в реальном движении Меркурия находятся далеко за пределами ошибок измерений. То есть модель Ньютона не в состоянии объяснить *все* явления, связанные с гравитацией, которые наблюдаются в природе.

Более точная модель для описания пространства, времени и гравитации разработана Альбертом Эйнштейном в начале 20 века. Его общая теория относительности дает предсказание для такого именно поведения планеты Меркурий, какое наблюдается.

Чтобы опровергнуть эту модель *точности* современных измерений *не хватает*. Но означает ли это, что самая точная на настоящий момент модель является «истиной в последней инстанции»? Конечно, нет! Это утверждение относится и ко всем другим моделям, которые мы с вами будем изучать на уроках физики.

Например, механическое движение подавляющего большинства объектов Солнечной системы хорошо описывается Ньютонической механикой. Точность расчетов, проводимых на её основе, с запасом перекрывает самые придирчивые требования. Вся современная космонавтика использует для расчетов именно механику Ньютона. Однако попытки применить механику Ньютона для объяснения особенностей поведения объектов микромира: молекул, атомов не всегда оказываются успешными. Само существование атомов и молекул и поведение газов и конденсированных тел при низких температурах невозможно объяснить в рамках классической механики и электродинамики. На смену классическим моделям пришли модели *квантовой механики*.

При изучении молекулярной физики в традиционном школьном курсе последовательно изучаются две модели: первая модель идеального газа и вторая молекулярно кинетическая модель газов, в которой *присутствуют* молекулы, и вводится упрощенное представление об их взаимодействии (упругие столкновения гладких бильярдных шаров). Едва затрагивается модель газа Ван-дер-Ваальса, которая является усовершенствованием модели идеального газа. Она фактически используется для того, чтобы показать возможность разделения вещества на две разные фазы при заданных условиях (температуре и внешнем давлении), а также для объяснения существования так называемых критических явлений. Поверхностные явления на границе раздела сред изучаются уже без привлечения моделей взаимодействия молекул. И, к сожалению, совсем не используются модели, описывающие конденсированное состояние вещества на основе представлений о взаимодействии молекул.

## Х

В учебнике, который находится у Вас в руках, используется простая модель взаимодействия молекул (классическая, то есть не квантовая) для выяснения свойств конденсированных тел. Это сделано с целью заполнить «брешь» между тем, что изучается в школе, и тем, что изучается студентами в высших учебных заведениях физико-математического профиля на старших курсах. Школьники должны знакомиться с основными идеями молекулярной физики всё-таки в школе, а знаменитых «трёх китов» – *молекулы существуют, молекулы непрерывно хаотически движутся и молекулы взаимодействуют* – для понимания устройства окружающего мира *маловато будет*.

Если используемая модель описывает природные явления с удовлетворяющей нас точностью, то мы будем эксплуатировать ее для объяснения максимально возможного набора физических явлений. При этом мы будем обращать внимание на явления, не объясняемые моделью, и указывать пределы её применимости. Конечно, для «необъяснимых» явлений в большинстве случаев есть и более точные модели, о существовании которых мы иногда будем упоминать. Если существующая модель дает неправильные предсказания, и это нас не устраивает, то здесь, как всегда, есть два пути:

Первый. Бросить физику и заняться вышиванием или коллекционированием марок. На этом поприще всегда можно рассчитывать на положительный результат.

Второй. Настойчиво пытаться создавать всё новые и новые модели, которые будут учитывать всё большее количество обнаруженных экспериментально явлений. На этом пути никто не застрахован ни от неудачи, ни от успеха.

Как проверить, насколько хорошо усвоен тот или иной раздел физики? Очень просто: нужно попробовать решить задачи, которые соответствуют тематике раздела. В конце учебника приведен список литературы, рекомендованной как для начального ознакомления с предметом, так и для более глубокого его изучения. Присутствуют в списке также сборники задач по физике разных авторов. Некоторые задачи сформулированы непосредственно в самом учебнике. Выбор задач за учителем и учеником.

Успехов Вам в изучении физики!