

# Оглавление

Предисловие. Чем эта книга отличается от других.....	4
Лекция первая. Конденсатор.....	10
Лекция вторая. Постоянный ток.....	26
Лекция третья. Магнитное поле, его создание и применение.....	46
Лекция четвертая. Источники электричества.....	68
Лекция пятая. Сеточные лампы.....	85
Лекция шестая. Электрон в объятиях волны.....	120
Лекция седьмая. Вторая эпоха СВЧ ЭВП.....	149
Лекция восемь. Ускоренные испытания.....	172
Лекция девятая. Вопросы в космосе.....	187
Лекция десятая. Вакуум.....	204
Лекция одиннадцатая. Массоперенос.....	235
Лекция двенадцатая. Поверхность.....	254
Лекция тринадцатая. Фазовые диаграммы.....	281
Лекция четырнадцатая. Прозрачное и непрозрачное.....	300
Лекция пятнадцатая. Да будет свет.....	323
Лекция шестнадцатая. О среднем – ни слова.....	342
Лекция семнадцатая. Теплопередача.....	362
Лекция восемнадцатая. Разные умножения, разные сложения.....	382
Заключение ...	401

# **Предисловие. Чем эта книга отличается от других**

Первое, что надо понять, стоя у прилавка книжного магазина или находясь на соответствующем сайте, – нужно ли читать конкретную книгу. Ответ зависит со стороны книги – от стоимости и объема, а с вашей стороны – от скорости чтения, наличия времени и денег. Однако главное – чем эта книга похожа на другие и чем от них отличается. Данная книга может считаться продолжением «Лекций о физике. По дороге из школы». Но если в первой речь шла в основном об устройстве физики как науки, то здесь вы узнаете о более конкретных вещах, о физических проблемах. Материал разделен на лекции; по сравнению с другими учебниками, каждая из них больше параграфа, но меньше главы, нечто среднее. Это материал, который может быть донесен до заинтересованной аудитории за одну лекцию. Вы, разумеется, можете изучать его в своем темпе, максимизируя пользу и удовольствие.

По сложности материал ориентирован на заинтересованных школьников. Причем это не записанные лекции, а тексты, созданные специально для книги, но после многих занятий и с использованием собранного для этих занятий материала. Такой путь более трудоемок, но мне было интереснее работать так, да и результат вроде бы получается лучше. Для большинства школьников физика – это такие буквы на доске, а в конце – числа и «ответ». Но они не понимают, что это белое из носика чайника и почему оно обжигает, с какой стати смартфон теплый и зачем гвоздю коэффициент трения. Показать привязку школьной физики к реальности – достойная задача, и я попытался это сделать. Материал относится к разным разделам школьного курса и сопровождается задачами и вопросами.

## **Особенности этой книги**

В учебниках принято деление физики на механику, тепло, электричество и т. д. В природе этого деления нет, в реальных объектах и ситуациях работают процессы, которые традиционно относят к разным областям. В этой книге 18 лекций, и вот как смешаны в них классические разделы, которые вы привыкли видеть в учебниках.



Рис. П.1

Вы, конечно, понимаете картинку. Чем ближе к соответствующему углу, тем больше в лекции материала по этому разделу. Вам не кажется, что на рисунке чего-то нет? Попробуйте придумать аналогичный способ, но включающий то, чего не хватает. Мы это обсудим в самом конце книги, на последней странице, так сказать, на десерт.

Автор пытался соблюдать следующие правила:

- погружение в вопрос должно быть многоуровневое: это вы учили в школе, это будете учить в хорошем институте, это – изучать потом, если станете работать в данной области;
- желательно не ограничиваться рассмотрением идеализированных элементарных процессов, а указывать на процессы реальные, в которых участвуют несколько элементарных, поскольку в физике определение элементарных процессов и их взаимодействия часто само является ключевой задачей;
- надо указывать на применения в науке или технике: физика везде, а не только в школе на уроке;
- уточнение школьных моделей может производиться в трех направлениях: просто уточнении, указании на диапазон значений величин и соответствующую точность, анализе противоречий.

Примеры уточнения – допустим, неидеальность идеального газа, нелинейность зависимости линейных размеров и сопротивления от температуры, нарушение закона Гука. Причем желательно по возможности указывать причины отклонений.

Диапазон изменения входящих в закон величин и соответствующая точность важны, ибо любой физический закон основывается на эксперименте, на других законах, на компьютерных и аналитических вычислениях, но эти основания имеют ограниченную точность. Уильям Томсон (лорд Кельвин) говорил, что еще много открытий таится вокруг шестого десятичного знака. Сегодня, более века спустя, слово «шестого» выглядит во многих случаях архаично, но смысл высказывания остался прежним.

Уточнения, вытекающие из противоречий, важны потому, что некоторые общепринятые модели противоречат друг другу. Понятие точечного заряда, а рядом – формула для потенциала с «г» в знаменателе. Определение идеального газа противоречит связи температуры и распределения молекул по энергиям. Сила тяжести приложена в точке в центре тяжести – это противоречит тому, что мы стоим на полу и сидим на стуле. То, что школьники никогда не удивляются, почему этот центр не вываливается у них между ног и не летит радостно к центру Земли, означает, что они воспринимают физику не как поле для мышления, а как нечто для заучивания. Физика выученная, но не используемая – это набор великолепного инструмента, забытый в дальнем углу сарая под кучей мусора, это мощный программный пакет, который занимает место, но никогда не используется.

Вот еще несколько примеров. Существует ли постоянный ток и как это согласуется с дискретностью заряда и историей человечества? Граница ли «красная граница фотоэффекта» и как это согласуется с наличием у электронов в металле энергии? Следует ли из закона сохранения заряда первое правило Кирхгофа и, вообще, верно ли оно само? Могут ли скачком меняться координата, скорость и ускорение? Действительно ли постоянный ток не течет через конденсатор и, вообще, что значит «течет через»? Одно и то же или нет – центр тяжести, центр масс и центр инерции? К какой точке приложены вес, реакция опоры, сила трения? Всегда ли газ заполняет весь предоставленный ему объем и существовала бы жизнь на Земле, если это было бы так? Равно ли нулю время соударения?

Что касается связи курса физики и устройства мира, то жили бы мы под водой, гидродинамика составляла бы основное содержание тома «Механика», первый закон «великого кальмара» Ньютона считался бы философской абстракцией, а как выглядело бы электричество – подумайте сами. Кстати, полезно прочитать книжку Бориса Штерна «*Ледяная скорлупа*». Она в том числе и об этом.

Разумеется, эти идеальные правила соблюсти автору удалось лишь отчасти. Это первая попытка реализовать новый формат. Заметим, что он пригоден для учебника по любой естественно-научной дисциплине.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В тексте есть **вопросы**, они выделены **жирным шрифтом**. Вопросы внутри лекций пронумерованы в квадратных скобках, например [1.2] – первая лекция, второй вопрос. После вопросов вы увидите, где ответы, где комментарии, а где новые вопросы... На них стоит пытаться отвечать, иначе Природа может потом не захотеть отвечать на ваши вопросы и будет вам обидно. Читать надо, положив рядом то, на чем легко оставить след, и взяв в руку то, что оставляет оный след при движении с нажатием в определенном диапазоне сил. Это потребуется для решения задач, да и некоторые вещи полезно, читая, изображать. То есть рисовать картинки, писать и решать уравнения.

Иногда некоторые школьники ощущают странный зуд – им хочется задать вопрос. Однако задать вопрос на языке физики они не всегда могут и, как Герасим и Муму, вынуждены ограничиваться общими формулировками: Зачем? и Почему? На первый вопрос ответ прост: физика нужна для всего. Ибо все, что окружает нас, создано техникой, а техника базируется на физике; самолет и корабль, смартфон и плеер, суперкомпьютер и GPS-навигатор, MRT-сканер и хирургический робот – все это создали инженеры, опираясь на то, что поняли физики. Кроме того, физика нужна для получения удовольствия теми, кто ее делает; делать физику – источник одного из трех самых сильных кайфов этой жизни. Я тщательно проверял и убедился – это истинно так.

Со вторым вопросом – Почему? – ситуация сложнее. Физика – это система моделей, теорий и экспериментов. Модели связаны, и связи сложны. По параметрам протона, нейтрона и электрона можно определить параметры атома, но только простейшего. По параметрам атома можно определить параметры газа, но не все, а твердого тела – так и вообще многие. Если спросить, почему останавливается скользящее по поверхности тело, ответом будет школьная или послешкольная (*Амонтона–Кулона*) модель трения. Если опять спросить «почему?», придется рассказать про модель *сваривание–срез–пропахивание*. Потом мы углубимся в механику непрерывных сред и, если, окончив серьезный институт, будем рыть долго и тщательно, доберемся до межмолекулярных и межатомных сил, до так называемых первых принципов – законов сохранения и термодинамики, которые тоже являются обобщением опыта.

Поэтому ответ на вопрос «почему?» в физике примерно таков: сначала цепочка известных моделей, потом пропасть, а на том ее краю, видимом в тумане, вроде бы светятся буквы: «Because this is how the Universe is structured». И мост, уходящий вдаль и вроде бы (рис. П.2) до чего-то дотягивающийся...

А иногда и совсем теряющийся в тумане: вот, например, такой (рис. П.3)...

Но ничего страшного! Внимательно, аккуратно, однако все равно – вперед.

А теперь – цитата!

*Мы найдем путь или проложим его.*

А кто это сказал, вы узнаете чуть позже. Он не имел в виду физику, но сказал хорошо.



Рис. П.2



Рис. П.3

Конкретное рассмотрение тех или иных разделов и вопросов зависит от того, что мне и моим ученикам показалось интересным, и от моего личного опыта работы в физике. Но есть вещи, которые упомянуть для расширения кругозора читателей хочется, а подробно рассмотреть их на школьном уровне и прямо так сразу не получится. Чтобы читатель, интересующийся физикой, знал, что именно искать в интернете и бумажных книгах, в этих случаях приводятся *ключевые слова*, которые надо использовать при поиске информации; они выделены *курсивом*. Если они даны в кавычках, то их и надо вводить в кавычках; почему – это вы, наверное, и сами знаете. Но если кавычек нет, вводите без. А если без – много мусора, то вводите с ними. Заодно и научитесь на лету диагностировать мусор. Вы собираетесь жить? А в жизни это ой как пригодится...

Приведение ключевых слов целесообразнее приведения ссылок на ресурсы, потому что ссылки устаревают намного быстрее. Хотя иногда даны и они. И учтите, что в русскоязычной «Википедии» в половине статей по физике и технике есть некорректности и ошибки. И, как говорится, не жалуйтесь потом, что вас не предупреждали.

И еще: эти лекции были написаны в разные годы, иногда потому, что ученики назадавали вопросов (осенью, зимой и весной), иногда потому, что совпало настроение и наличие времени (летом). И лишь потом они были собраны в данную книгу. Поэтому кое-где есть повторы, и даже рисунки иногда дублируются. Так что, если вам что-то кажется знакомым – не надо себя щипать, вам это не снится; может быть, вы это вчера как раз и читали.

# ЛЕКЦИЯ ПЕРВАЯ

## КОНДЕНСАТОР

### ЗАЧЕМ ОН НУЖЕН

Начнем мы внезапно – с середины электростатики. А именно с вещи, которая наверняка есть у вас в кармане. Более того, у вас в кармане, скорее всего, имеется несколько сотен конденсаторов.

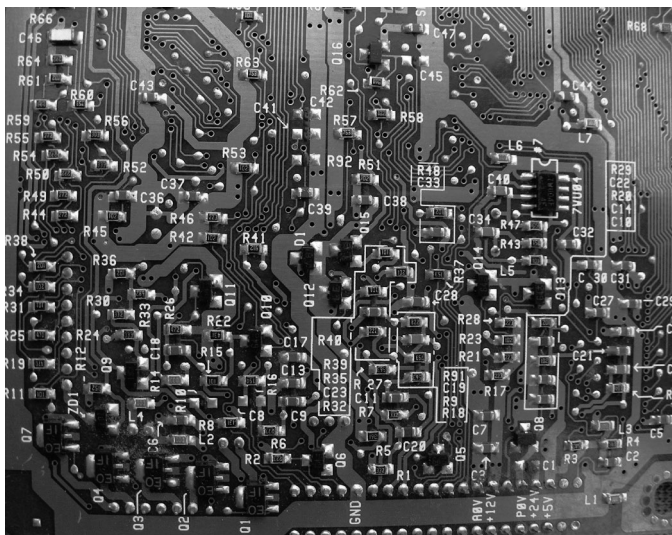


Рис. 1.1

Посмотрите на рис. 1.1: везде, где стоит буква «С», – там конденсатор (насчет буквы «R» – в следующей лекции). Что делают все эти «С» и почему об этом в учебниках ни слова? Почему «ни слова» – не знаю, а делают они вот что: накапливают энергию, фильтруют сигнал, интегрируют и дифференцируют, сдвигают фазу. Причем часть этих функций видна из школьного учебника. А если присмотреться – то и все.

Энергия, накопленная в конденсаторе, используется, например, в фотоаппаратах, смартфонах и в некоторых моделях сотовых телефонов. В фотоаппаратах и смартфонах она преобразуется в энергию вспышки света, а в телефоне иногда потребляется передатчиком. Но и там и там энергия,



вообще-то, хранится в аккумуляторе, зачем же перекачивать ее из аккумулятора в конденсатор? Ответ: внутреннее сопротивление аккумулятора ограничивает максимальный ток, а фотоаппарату для работы вспышки и телефону при поиске соты нужен ток побольше. У конденсатора в смысле большого токоотбора тоже есть два ограничения (**подумайте, какие [1.1]**), в данном случае они менее существенны, но позже мы к ним вернемся. **Кстати, какими двумя другими способами можно записать формулу для энергии  $E = CU^2/2$  [1.2]? И еще вопрос про эту формулу: при каком условии на заряды она верна [1.3]?**

### [1.1]

1. У конденсатора есть выводы, а у них – сопротивление и индуктивность. Сопротивление ограничивает ток согласно закону Ома, а индуктивность образует вместе с емкостью колебательный контур. По формуле Томпсона можно определить период колебаний, и если считать, что весь заряд протечет за первую половину периода, то опять же можно определить ограничение на ток. Реально работают оба ограничения, но для грубой оценки можно считать, что ток ограничен меньшим из этих двух значений. Но это не все – чем еще может быть ограничен ток?
2. Сопротивлением и индуктивностью самих обкладок. Причем в некоторых условиях это ограничение существеннее. В каких?
3. Например, если выводы короткие и толстые, а обкладки длинные и тонкие. Почему?

### [1.2]

1. Замените в формуле  $CU^2/2$  емкость  $C$  или напряжение  $U$ , используя определение  $C = Q/U$ , и получите эти две формулы.
2. Ну вот же они:  $E = QU/2$  и  $E = Q^2/2C$ .

### [1.3]

1. Эта формула верна, если конденсатор заряжен правильно, т. е. заряды обкладок равны по модулю и противоположны по знаку. Верна ли формула  $C = Q/U$ , если заряды пластин не равны по модулю?
2. Она вообще неприменима – в аналогичной формуле должны принимать участие оба заряда. А какая формула, относящаяся к конденсатору, верна независимо от того, как заряжены пластины?
3. Формула для емкости через геометрические параметры, например площадь обкладок и зазор.

Что касается фильтрации сигнала, то, если прикладывать к конденсатору обычное переменное (синусоидальное) напряжение одинаковой амплитуды, но разных частот, то протекающий по проводам ток будет уменьшаться пропорционально частоте. На нулевой частоте, т. е. при постоянном на-

пряжении, он – в школьном приближении – станет равным нулю. То есть эквивалентное сопротивление конденсатора обратно пропорционально частоте, а постоянный ток вообще, как иногда говорят, через конденсатор не течет. Формулировка эта не совсем верна, и сейчас мы ее обсудим. Но уже видно, что конденсатор может применяться для фильтрации, т. е. разделения сигналов, – как сам по себе, так и в составе специальных схем, называемых фильтрами.



Рис. 1.2

На рис. 1.2 показан такой фильтр с изображенной прямо на нем (редкий случай) схемой. Конденсатор, соединяющий провода (C1), и конденсаторы, соединяющие провода с корпусом всего устройства (C2), пропускают через себя высокочастотную помеху, не давая ей проникнуть через фильтр.

Про интегрирование и дифференцирование сигнала прямо в школе не говорится, но сообразить это просто. Если вы знаете математическое определение, то сами сообразите, что заряд конденсатора, а значит, и напряжение на нем – это интеграл от тока по времени, а ток, соответственно, – производная от заряда и напряжения. Это в идеале; реальная ситуация, как всегда, сложнее, и тут мы немного выйдем за школьный уровень, но чуть позже.

Ситуация со сдвигом фазы синусоидального сигнала в школе иногда упоминается. А именно если на конденсатор подано синусоидальное напряжение, то протекающий в проводах синусоидальный же ток оказывается сдвинутым относительно напряжения на четверть периода ( $\pi/2$ ) назад.

## ПРОТЕКАНИЕ ТОКА

Когда мы говорим, что ток течет по проводу, по сопротивлению или индуктивности, по плазме или электролиту, мы имеем в виду перемещение носителей заряда – электронов или ионов. Ионы принимают участие в переносе заряда в плазме, но небольшое, ибо их масса много больше массы электронов. Ионная проводимость, но обычно очень маленькая, имеется в газах, если там есть ионы, а в школе рассказывают, откуда они там. Есть ионная проводимость и у твердых тел, вам не говорили, но до этого легко догадаться – про диффузию вы знаете, а кто диффундирует в ионных кристаллах? В электролитах вся проводимость – ионная. В вакууме можно организовать поток хоть электронов, хоть ионов – вот вам и проводимость; хотя можно сказать, что это уже не вполне вакуум, но не будем придираться. А что происходит, когда по проводу, разорванному конденсатором, течет переменный ток? Через зазор ионы и электроны при не слишком высоких напряженностях поля не прыгают. А чтобы узнать про ситуацию при высоких напряженностях поля – запросите *автоэлектронную эмиссию*. Позже я об этом расскажу.

В зазоре – если в нем идеальный вакуум или идеальный «школьный» диэлектрик – мы имеем только переменное электрическое поле (и гравитационное, но оно при обычных энергиях с электромагнитными явлениями не связано). Это переменное поле (внимание, сейчас будет неожиданность) имеет некоторые свойства тока. Например, оно создает в пространстве магнитное поле – как и ток. Более того, это переменное поле, помножив его на некоторый коэффициент, даже называют *током смещения*, чтобы таким вот хитрым путем выполнить *первое правило Кирхгофа*, точнее – его следствие, непрерывность тока в цепи. Более того, вы сами легко сможете получить этот коэффициент, связав постоянный ток, скорость роста заряда, напряжение и поле в зазоре... И получится, что плотность тока смещения в зазоре равна  $\epsilon_0 dE/dt$ , или, если вы не понимаете этой записи,  $\epsilon_0 \Delta E/\Delta t$ , где поле растёт равномерно на  $\Delta E$  за время  $\Delta t$ . Если же ток, текущий по проводам, а не прыгающий шустрými электрончиками через зазор, вы не готовы называть «текущим через» конденсатор, то тогда ведь и переменный ток через конденсатор не течет.

Кстати, мы только что допустили чудовищный криминал – постоянный ток, текущий по проводам, подходящим к конденсатору! И ничего не случилось, просто пока он течет, заряд и напряжение на конденсаторе растут. Неограниченно они расти не могут, т. е. постоянный ток может течь лишь ограниченное время. Если же вы не готовы назвать его постоянным, то учтите, что постоянных токов вообще не бывает, ибо сто лет назад ни один из

современных постоянных токов не тек. И даже вчера текли не очень многие. Можете, кстати, на досуге поразмышлять, **какие постоянные токи текли год и десять лет назад [1.4]**. Примеров немного, но они есть.

Кстати, чуть не забыл – **постоянный ток может течь в проводах, подходящих к конденсатору, даже при постоянном напряжении. При каком условии [1.5]?**

#### [1.4]

1. Например, ток солнечных батарей на спутниках. Впрочем, этот ток не совсем постоянный. Почему?
2. Потому что спутник бывает в тени. Но вот ток, который генерирует радиоизотопный генератор (*РИТЭГ*) на аппаратах *Пионер*, *Вояджер* и *Новые горизонты*, постоянен. Хотя и он не вполне постоянен, но почему?
3. Потому что период полураспада не бесконечен.

#### [1.5]

1. При линейном увеличении площади пластин конденсатора. А есть ли еще способ?
2. Да, при уменьшении зазора. Но как он должен уменьшаться?
3. Обрато пропорционально времени.

## ФОРМУЛЫ ДЛЯ ЕМКОСТИ

Обратимся к определениям емкости – их два. Взаимная емкость  $C = Q/U$  – это когда заряды двух тел равны по модулю и противоположны по знаку,  $Q$  – модуль любого, а  $U$  – разность потенциалов между ними. Емкость уединенного тела – это когда  $Q$  – просто заряд, а  $U$  – потенциал относительно бесконечности. Определения связаны корректно – если мы напишем формулу для емкости сферического конденсатора (шар внутри сферы) и устремим радиус сферы к бесконечности, то получим именно формулу для емкости уединенного тела. Тут-то все в порядке, но мы подошли вплотную к другой проблеме.

Кстати, те, кто знает формулу для интеграла от степенной функции, сообразите, **почему в двумерном пространстве**, когда в законе Кулона в знаменателе не  $r^2$ , а  $r$ , **потенциала относительно бесконечности не существует [1.6]**.

#### [1.6]

1. Потому что в этом случае работа при удалении заряда растет как логарифм, т. е. до бесконечности. А как обстоит дело при других размерностях пространства?
2. В одномерном случае растет линейно, т. е. еще быстрее. А что при больших размерностях – четыре, пять и т. д.?
3. Вот при больших размерностях в этом смысле все хорошо.

Формулу для емкости сферического конденсатора вы легко получите сами, но что делать с цилиндрическим и плоским конденсатором? Обычное решение – считать поле между пластинами однородным, а поле вне его равным нулю. Ответ получается правильный, но при очевидном условии, что зазор мал (очевидном в том смысле, что, когда он велик, формула неверна). Однако мал по сравнению с чем? Второй величины с размерностью длины в задаче нет, а сравнивать можно только величины одной размерности. Другой способ вывода формулы для емкости плоского конденсатора – разрезанием и «разворачиванием» сферического конденсатора – приводит к такому же ответу, но ответа на вопрос об ограничениях формулы не приносит. Тогда прибегают к интуиции и ставят условие – чтобы объем области поля рассеивания был мал, причем считают ширину этой области равной ее высоте, т. е. зазору. Это приводит к разумному условию – зазор много меньше отношения площади к периметру, но есть ситуации, когда это условие подводит. **Не хотите ли попробовать сообразить, когда [1.7]?**

### [1.7]

1. При одной и той же площади пластин периметр может изменяться в очень широких пределах, от  $(4\pi S)^{1/2}$  до бесконечности. Во втором случае условие на зазор становится слишком жестким. Сообразите, как сделать периметр очень большим.
2. Прорезать пластину тонкими прорезями. Это явно ни на что не влияет, а условие малости зазора формально нарушает.

Определение пределов и точности формул не всегда простая задача; она и не должна быть простой, потому что для определения границ применимости простой модели мы должны что-то знать в рамках более сложной модели. В данном конкретном случае получить ответ можно для любой геометрии: для самых простых случаев – аналитический, хотя и приближенный, для остальных – численный. Разумеется, это уже не школьный, а институтский материал, причем не всякого института.

Школьная формула для емкости плоского конденсатора –  $C = \varepsilon\varepsilon_0 S/d$ , а относительная погрешность, в соответствии со сказанным выше, может быть оценена как  $\Delta C/C = Pd/\varepsilon S$ , где  $P$  – периметр. Множитель  $\varepsilon$  стоит только в знаменателе, потому что диэлектрик только внутри конденсатора, между пластинами; если он есть и снаружи – а такие конструкции бывают, – **то подумайте, что делать с этим множителем [1.8].**

### [1.8]

1. Как что? Ввести его в числитель, а потом сократить. А если снаружи не такой диэлектрик, как внутри, но и не воздух?
2. Значит, в формуле останутся два таких множителя. И ничего страшного.

Заметим, что формула для емкости, приведенная выше, означает, что емкость зависит только от геометрических параметров тела или тел и от свойств среды, т. е.  $\epsilon$ . Однако вспомним определения емкости и взаимной емкости – в формуле участвует один заряд, но количество тел во втором случае – два. Поэтому для определения взаимной емкости нужно или использовать другую формулу, или накладывать какое-то условие на заряды. Разными зарядами тел делать нельзя потому, что в этом случае разность потенциалов станет зависеть от того, на каком из тел, если они не одинаковы, какой заряд, т. е. емкость перестанет зависеть только от размеров тел и среды. Просто равными зарядами пластин объявить тоже нельзя – для плоского конденсатора разность потенциалов будет равна нулю. Остается – равными по модулю и противоположными по знаку.

Разумеется, никто не мешает рассмотреть ситуацию с «неправильно заряженным» конденсатором – с двумя произвольными зарядами на двух электродах. Если конденсатор плоский, сферический или цилиндрический, легко определить разность потенциалов пластин. Но давать определение емкости так, как оно обычно дается, можно только при стандартном условии, касающемся зарядов, – что они равны по модулю и противоположны по знаку.

Исторически, впрочем, такое определение могло быть принято просто потому, что в подавляющем большинстве случаев конденсаторы применяются именно так. Потому что если конденсатор заряжается током, т. е. включен в какую-то схему, то в силу первого правила Кирхгофа заряды пластин оказываются связаны именно так.

## **НЕИДЕАЛЬНОСТЬ КОНДЕНСАТОРА**

Выше было сказано, что у конденсатора в смысле большого токоотбора тоже есть два ограничения. Первое тривиально – сопротивление подводящих проводов и самих обкладок. Причем сопротивление обкладок тем больше, чем их материал тоньше, а с точки зрения увеличения емкости при заданном объеме их имеет смысл делать как раз тоньше. Здесь, как это обычно и бывает в технике, параметры изделия оказываются связаны, и изо всех сил улучшая один, мы ухудшаем другой. Поэтому не бывает просто наилучших параметров или изделий – для разных задач лучшими оказываются разные.

Второе ограничение заметить труднее, потому что про сопротивление в школе говорится часто, а про индуктивность – редко. Между тем у всякого проводника есть не только емкость, но и индуктивность. То есть при протекании по нему тока возникает магнитное поле с энергией  $LI^2/2$ , а при изменении тока из-за изменения вызванного им магнитного поля возникает ЭДС, равная  $LdI/dt$ , или, если вы не понимаете этой записи,  $L\Delta I/\Delta t$ , где поле растёт равномерно и изменяется на  $\Delta I$  за время  $\Delta t$ . То, что у проводника есть емкость и индуктивность, означает, что он сам является резонансным контуром, настроенным на соответствующую (вспомните формулу Томп-

сона) частоту, и ток через него не может существенно измениться за время, много меньшее периода этой частоты. Поэтому, если мы хотим разрядить конденсатор за весьма короткое время – а в физике и технике эта задача возникает часто, – применяют специальные *безындукционные конденсаторы*, с уменьшенной, по возможности, индуктивностью.

Уменьшая емкости и индуктивности, мы переходим от систем с «сосредоточенными параметрами», в которых емкости, сопротивления и индуктивности реализованы в виде отдельных элементов (конденсаторов, резисторов и катушек, соединенных проводами), к системам с «распределенными параметрами», где нет этих отдельных элементов. А есть конструкции, имеющие сопротивление, индуктивность и емкость, распределенные по поверхности и объему, и специальные методы расчета, о которых вам что-то расскажут на старших курсах соответствующей специальности серьезного института.

Учтите, что слова «конденсатор» и «емкость», а также «резистор» и «сопротивление», «катушка» и «индуктивность» часто употребляют как синонимы. Забредете на радиотехнический, радиолюбительский и подобные форумы – не пугайтесь. Раз уж мы заговорили о конденсаторах, назовем несколько физических и технических проблем в этой области и примерно очертим возможности физики. Ну, например, емкость зависит от температуры, но не потому, что температура влияет на размеры, – гораздо сильнее зависит от нее диэлектрическая проницаемость. Почему вообще  $\epsilon \neq 1$ , почему среды как-то влияют на электрическое поле? Молекулы и атомы, попав в электрическое поле, создают свое поле, направленное в среднем навстречу исходному, и суммарное поле оказывается меньше. Поведение молекул сильно зависит от температуры, а также от частоты переменного электрического поля, но теория этих зависимостей в той части, в которой она вообще создана, лежит существенно выше школы. Там есть много чудес, например *гистерезис* – зависимость  $\epsilon$  от напряженности поля зависит от того, измеряли ли мы ее, начиная с нуля и увеличивая поле, или сначала увеличили, а потом стали снижать и измеряли при снижении. Есть вещества, изменяющие свои размеры в электрическом поле и создающие такое поле при деформации, есть скачком меняющие свои свойства при некоторой температуре – аналог точки Кюри ферромагнетиков, а есть запоминающие поле, в котором они находились, – опять же аналог остаточной намагниченности. Что-то об этом узнать вы имеете шанс в институте, впрочем, можно попробовать и сейчас – *сегнетоэлектрик, пьезоэлектрик, пьезоэлектрик, электрет, гистерезис*.

Вот вода, ее часто приводят как пример вещества с высокой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 81$  (и зря – потому что полно веществ с большей  $\epsilon$ ). С другой стороны, в оптике упоминается, что коэффициент преломления для воды  $n = 1,33$ . Сначала меня это не смущало, но потом прочел в учебнике, что оптики и электрики характеризуют электромагнитные свойства традиционно по-разному: электрики – через ослабление поля и обознача-

ют  $\epsilon$ , а оптики – через скорость распространения электромагнитной волны и обозначают  $n$ , но, по сути, это одно свойство, причем  $\epsilon = n^2$ . Численные значения я помнил и удивился. Ларчик, однако, открывался просто: значение  $\epsilon = 81$  приводится для постоянного напряжения и низких частот, электрики работают в основном с частотами 50, 60 и 400 Гц. **Оптики же имеют дело с частотами, на много порядков большими. Кстати, какими [1.9]?** Если не помните, воспользуйтесь некоей формулой, а диапазон длин волн видимого света запомнить легко – 0,38–0,76 мкм, октава (на самом деле чувствительность глаза убывает к краям диапазона плавно, границы немого условны, да и в разных книжках указываются по-разному). К слову, иногда говорят, что у воды из всех жидкостей максимально высокая  $\epsilon$ , – учтите, что это не так. Насчет рекордных значений – проще всего посмотреть в книжке «*Рекорды и пределы*» (Библиотечка «Квант», выпуск 136).

### [1.9]

1. Обычно, когда говорят об оптике, имеется в виду диапазон частот, в котором излучение при не слишком малой и не слишком большой мощности воспринимается глазом, – (4–8)•10<sup>14</sup> Гц, 400–800 ТГц. А как называют излучение с большими и меньшими частотами?
2. Ультрафиолетовое и инфракрасное, соответственно ультрафиолетовая и инфракрасная оптика. Вообще, слово «оптика» применяют в очень широком диапазоне частот, говорят *рентгеновская оптика*, *радиооптика* – все дело в том, какие пишут уравнения.

Второй после емкости важный для практики параметр конденсатора – максимальное рабочее напряжение; это видно из формулы для энергии, а в случаях «неэнергетических» применений оно просто определяет возможность использования того или иного конденсатора – при большем напряжении он выйдет из строя. Максимальное напряжение определяется пробоем изоляции, т. е. ее разрушением, а формально говоря – превращением из изолятора в проводник. Физические процессы, развивающиеся при этом, многочисленны и замысловато переплетены, и вполне достаточно для послешкольного уровня они изложены в книжке, которая только что была упомянута. Заметим, что на школьном уровне можно назвать некоторые из этих процессов, например ударную ионизацию, когда электрон, разогнанный электрическим полем, при столкновении с атомом передает ему достаточно энергии для ионизации. Понятно, что происходит дальше? Где был электрон, стало два, где два – там четыре, где четыре – потом восемь... При этом часть электрической энергии превращается в тепло, и несчастный диэлектрик – между прочим, оксид алюминия, который плавится при двух с небольшим тысячах градусов, а кипит про трех тысячах, – превращается в пар с таким давлением (**кстати, как его можно оценить [1.10]?**), что разрывает изнутри конденсатор. Повезло, что никто не оказался на пути разлетающихся осколков (рис. 1.3), но мои сотрудники бережно собрали их – чтобы я мог вам об этом рассказывать.





Рис. 1.3

**[1.10]**

1. Один из способов – по разлету осколков. Сначала оценить скорость осколков по тому, что они смогли пролететь 20 м, упав не более чем на метр, а потом оценить давление по работе расширяющегося пара, которая превратилась в кинетическую энергию осколков. Это, конечно, грубая оценка, но порядок величины мы получим. А нет ли второго способа?
2. Второй способ есть. Надо считать, что вся энергия заряженного конденсатора пошла на нагрев и фазовые переходы и нагрев фаз оксида алюминия, и по финальной температуре оценить давление.

Впрочем, если и не доводить дело до пробоя, то срок службы конденсатора оказывается существенно зависящим от напряжения, при котором он работает (рис. 1.4), – значит, происходят в нем по-тихому какие-то процессы, о которых рассказано в той же, только что названной, книжке.



Рис. 1.4

Впрочем, хотя все эти процессы физические либо химические, а их переплетение и взаимодействие – сложная и довольно узкая область, в институте они могут рассматриваться в курсе электротехнических материалов или электронно-вакуумных приборов рядом с понятием *вакуумный пробой*. Термину «вакуумный пробой» стоит удивиться – для любого электрического процесса, т. е. процесса перемещения заряда, требуется вещество, а откуда оно в вакууме? Ответ прост – из электродов: перенос заряда через вакуум – хоть в вакуумном конденсаторе (рис. 1.5), хоть в электронном приборе – осуществляет, разумеется, материал электродов. А вот как его угодило попасть в вакуум, т. е. как электрическое поле его туда переместило – подумайте сами или прочитайте в упомянутой выше книге. Кроме того, на вполне школьном уровне рассказано о пробое в статье «*Что такое электрический пробой*» («Квант», 1984, № 8).



Рис. 1.5

## **УТЕЧКИ И ПРОБОЙ**

Вернемся к классическим конденсаторам: с обычным твердым диэлектриком – керамикой или полимерным материалом. В отличие от школьного идеального диэлектрика у любого реального диэлектрика есть проводимость, его сопротивление бесконечно. Тогда возникает вопрос – чем отличается диэлектрик от полупроводника? В школе, как вы помните, металлы и полупроводники различали по тому, растет или падает сопротивление с нагревом, а про диэлектрики вопрос не возникал, потому что их сопротивление считалось бесконечным. А как нам теперь отличать диэлектрик от полупроводника? У обоих с нагревом сопротивление падает. Вообще говоря, различие условно, иногда пишут, что к диэлектрикам относят вещества с удельным сопротивлением более  $10^8$  Ом•м или шириной

*запрещенной зоны* более 3 эВ. На практике к полупроводникам обычно относят пять элементов – В, Si, Ge, Se, Те – и многие соединения, ориентируясь в основном на применение. Список этих соединений и сведения об их свойствах вы можете получить тут: «*Научно-популярные статьи по физике и астрономии в интернете*», – если нырнете в этот линк-лист почти до конца, до раздела «Полупроводниковые материалы». Примечание: в некоторых старых книжках список элементарных полупроводников был больше, но потом возник термин «полуметаллы», определения уточнились... Сейчас, кроме перечисленных выше, среди элементов полупроводниками считают одну из аллотропных модификаций фосфора («*черный фосфор*») и одну из модификаций олова («*серое олово*»).

Учтите, что вообще применение материала зависит не от названия, а от его свойств и условий применения. Например, если сама среда или устройство очень низкоомно, то в качестве изолятора может применяться и вещество, которое обычно в качестве изолятора не воспринимают. Например, в генераторах коротких мощных импульсов для изоляции может применяться вода, которую обычно считают проводником. Но все-таки очищенная – из нее удалены растворенные газы и прочие вещества.

В случае, если у конденсатора есть проводимость и к нему приложено напряжение, произойдет следующее. Во-первых, **он перестанет правильно интегрировать ток – сообщите почему [1.11]**. Во-вторых, в нем будет выделяться мощность. Это тепло надо отводить, иначе конденсатор начнет греться, при этом сопротивление изоляции будет падать, ток – еще более нарастать, тепловыделение тоже, и в некоторых условиях начинается лавинный их рост. Это механизм так называемого электротеплового пробоя.

### [1.11]

1. Потому что часть заряда начнет утекать на противоположную пластину. Это вызовет возникновение погрешности, увеличивающейся с ростом напряжения и временем интегрирования. Какой дополнительный эффект при этом возникнет?
2. Выше причина дополнительного эффекта указана – нагрев конденсатора. Дело в том, что при этом падает сопротивление (в диэлектриках оно уменьшается при нагреве), что еще более увеличивает утечки.

Однако не будем подавать на конденсатор слишком большое постоянное напряжение, а подадим допустимое, но переменное. Мы обнаружим, что он греется, причем нагрев зависит от частоты, с ее снижением уменьшается, а при переходе к постоянному напряжению уменьшается намного. Оказывается, есть какой-то фактор, зависящий от частоты. Этот фактор называется *диэлектрические потери*. Их механизм на элементарном уровне прост – переменное электрическое поле дергает ионы, происходит преобразование энергии электромагнитного поля в механическую энергию молекул, а она через соударения передается другим молекулам,

и объект нагревается. Если частота и амплитуда переменного поля таковы, что конденсатор может заметно нагреться, эффект приходится учитывать; на рис. 1.6 показан конденсатор, на котором обозначена предельная мощность (0,3 кВт), способная переходить в тепло без риска вывести его из строя. Подробнее об этом можно прочитать во многих источниках, запрос – *диэлектрические потери*. Кстати, эта предельная мощность, 0,3 кВт, указана с размерностью «кВА» – киловольт-ампер.



Рис. 1.6

Нагрев протекающим по диэлектрику током и диэлектрические потери – вещи, полезные в быту: благодаря им греет еду СВЧ-печь или микроволновка.

## ПОЛЕ И МАТЕРИАЛ

После перерыва на пищу телесную надо приобщаться и к духовной. Конденсаторы – и не только они – используются в искусстве: *радиодетали поделки* либо *радиодетали украшения* (рис. 1.7, 1.8).



Рис. 1.7



Рис. 1.8

Теперь вернемся к теории. Начнем с диапазона величин, входящих в формулы для емкости и энергии и точности этих формул. При выводе формулы для емкости сферического конденсатора мы вроде бы никаких предположений не делали. Но это не так. Мы использовали:

- стандартные предположения электростатики – поле не проникает в проводник;
- модель непрерывных сред – атомов не существует, среда идеально непрерывна.

Первое неверно хотя бы потому, что поле прекрасно проникает в диэлектрики и полупроводники, причем глубина проникновения обратно пропорциональна корню из концентрации свободных электронов (это будет в институте – *дебаевский радиус*). Поэтому, увеличивая эту концентрацию, можно плавно перейти от полупроводников к проводникам и понять, что поле обязано проникать в металл, хотя и неглубоко, на толщины порядка межатомного расстояния. Следовательно, и поверхностный заряд не будет располагаться, как часто пишут, в бесконечно тонком слое на поверхности. Поэтому любые формулы для емкости теряют точность, когда размеры пластин и зазор становятся сравнимы с межатомными расстояниями. Реальное распределение плотности поверхностного заряда довольно замысловато, это не школьный и не институтский материал, но даже простейшая модель (поверхностный заряд равномерно распределен в слое некоторой толщины) позволяет без применения каких-либо искусственных приемов получить правильный ответ для силы, действующей со стороны поля на поверхность проводника. **Можете проделать это тривиальное вычисление сами и убедиться [1.12].**

**[1.12]**

1. Если заряд распределен в слое равномерно, то поле убывает при углублении в слой линейно, среднее поле равно максимальному полю, деленному на два. Вспомните формулу для связи поверхностного заряда и поля в зазоре и получите в итоге правильный ответ.
2. На поверхность действует сила  $F = \epsilon\epsilon_0 E^2 S/2$ , без учета уменьшения поля при углублении в проводник получается неправильный (вдвое больший) ответ.

Вообще, помнить о дискретности среды нужно не только чтобы Демокрит не обижался, но и потому, что одно из направлений развития физики и инженерии – управление отдельными атомами, конструирование на уровне атомов, физика всех процессов на этом уровне. В этой области классические формулы теряют сначала точность, а потом и смысл. В нанометровых зазорах и поле устроено иначе, и ток через них может распространяться – туннельным эффектом через вакуум, – и даже, сколь это ни удивительно, звук (через электрическое поле колеблющихся зарядов). Поэтому осмысленная работа в модной области «нано» требует знания физики на более глубоком уровне, нежели «средний институтский».

Добавим к этому, что идея о «бесконечно тонком» заряде на поверхности и отсутствии поля в проводнике делает невозможным равномерное распределение заряда по поверхности шара – если поля нет, то кто будет «распределять» заряды? Нет поля – нет силы! А «точечный электрон» означает обрушение рынка энергоносителей – в уравнении для потенциала радиус стоит в знаменателе, т. е. один-единственный точечный электрон нес бы бесконечную энергию.

Вот еще две задачи из электростатики: одна из них важна для практики, а вторая не важна, но уж очень красива. Первая – это проблема электризации трением, с этим мы все сталкивались. Задача эта интересна, в частности, тем, что хотя сам эффект (это лишь один из процессов, происходящих при трении) известен более двух с половиной тысяч лет, но некоторое понимание механизма явления было достигнуто лишь в середине прошлого века. В хорошем школьном учебнике краткая информация о явлении имеется, но люди продолжают писать в интернете глупости на эту тему. Более подробно об электризации трением было рассказано в статье «*Что же такое электризация трением?*» («Квант», 1985, № 6). Заметим, кстати, что авторы хорошего учебника, упоминая об этом эффекте, почему-то написали про «сотрудников физико-технического института в Санкт-Петербурге», хотя у научных работ есть конкретные авторы, и есть правило приличия их называть.

А забавная задача – это равновесие электронов в проводнике. Пусть кусок металла стоит на столе. Гравитация на электроны проводимости действует? Конечно. **Тогда почему они не падают на нижнюю плоскость куска? Какая сила держит их не весу [1.13]?**

**[1.13]**

1. Единственная сила, которая может держать на весу в данном случае электроны, – электрическое поле. Приравняйте вес и силу, действующую со стороны поля, и оцените возможность измерения соответствующей разности потенциалов.
2. Величина получается столь малая, что никакой надежды на ее экспериментальное измерение нет. А как вы полагаете, влияет ли на этот эффект деформация самого материала проводника?
3. При деформации кристаллической решетки ионы и атомы перемещаются как целое вместе со своими электронными оболочками, поэтому электрическое поле при не слишком быстрой деформации возникать не должно.

В заключение этой лекции – небольшая шутка. Постоянное указание на то, что наша модель почти верна, верна при каких-то условиях, не совсем верна и т. д., может породить у вас ощущение, что физика – это бескрайнее болото, а вы стоите на единственной в нем кочке.

Это ощущение ошибочно: кочка начинает медленно погружаться, и вы понимаете, что это вообще не кочка! А голодный – и только поэтому проснувшийся – семиметровый крокодил.