

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

Г.М. Трунов

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ
ПО КУРСУ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ**

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2011

УДК 53(0,75.8)

T78

Рецензенты:

кандидат техн. наук, доцент *В.Г. Белецкий*
(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет);
доктор физ.-мат. наук, профессор *Е.Л. Тарунин*
(Пермский государственный национальный
исследовательский университет)

Трунов, Г.М.

T78 Дополнительные задания по курсу общей физики
[Электронный ресурс] : учебное пособие / Г.М. Трунов :
Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – Электрон. дан.
(462 кб). Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2011. – 1 электрон. опт.
диск (CD-ROM) : 61 с. печ. текста.

Утверждено РИС ун-та в качестве учебного пособия.

ISBN 978-5-398-00718-3

В учебном пособии используется эффективный педагогический прием – перед изложением раздела курса физики приводятся либо реальная история, случившаяся с известными физиками, шутка или анекдот, связанные с изучаемым разделом физики. Такой прием позволяет сформировать у студентов дополнительный побудительный мотив как для лучшего восприятия раздела физики, излагаемого преподавателем, так и для дальнейшей самостоятельной работы.

Приведены основные теоретические сведения для самостоятельного изучения метода анализа размерностей.

Предназначено для студентов и преподавателей вузов и средних учебных заведений.

УДК 53(0,75.8)

ISBN 978-5-398-00718-3

© ПНИПУ, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. Механика	7
1.1. Системы отсчета	7
1.2. Кинематика	8
1.3. Динамика	8
1.3.1. Силы в механике	8
1.3.2. Законы Ньютона	9
1.4. Работа, энергия, мощность	11
1.5. Законы сохранения	11
Глава 2. Молекулярная физика и термодинамика	13
2.1. Молекулярно-кинетическая теория	13
2.2. Термодинамика	17
Глава 3. Электричество и электромагнетизм	22
3.1. Электростатика	22
3.2. Постоянный электрический ток	24
3.3. Магнитное поле	25
3.4. Электромагнитная индукция	26
Глава 4. Колебания и волны	28
4.1. Механические и электромагнитные колебания	28
4.2. Электромагнитные волны	29
4.3. Скорость света	31
4.4. Переменный ток	32
Глава 5. Оптика	33
5.1. Геометрическая оптика	33
5.2. Волновая оптика	33
5.3. Квантовая теория света	34
Глава 6. Элементы атомной и ядерной физики	38
6.1. Теория атома водорода	38
6.2. Физика ядра	38
6.3. Элементы квантовой механики	40

Глава 7. Единицы и размерности физических величин ...	42
7.1. Общие понятия о системах физических величин и системах единиц	42
7.1.1. Системы физических величин	42
7.1.2. Размерность физической величины	44
7.1.3. Выбор числа основных величин	46
7.2. Международная система единиц (СИ)	47
7.2.1. Основные единицы СИ	47
7.2.2. Единицы и размерности механических величин	48
7.2.3. Единицы и размерности электромагнитных величин	50
7.3. Анализ размерностей – эффективный метод решения задач	53
Литература	60
Приложение	61

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последнее время приходится сталкиваться с тем обстоятельством, что многие студенты не подготовлены к изучению курса общей физики как основной составляющей дисциплины «Концепции современного естествознания» (гуманитарные специальности), так и как самостоятельного предмета (технические специальности).

Для формирования побудительного мотива к более глубокому и самостоятельному изучению физики предложено воспользоваться приемом, который применил Р. Фейнман при изложении темы «Движение». Он сначала приводит анекдот [1]:

«Полицейский останавливает машину и говорит женщине, сидящей за рулем: «Мадам, вы нарушили правила уличного движения. Вы ехали со скоростью 90 километров в час». Женщина отвечает: «Простите, это невозможно! Как я могла делать 90 километров в час, если еду всего лишь 7 минут!»

и затем рассматривает все трудности, с которыми приходится сталкиваться при определении скорости.

Такой прием – использование шутки, анекдота или описания случившейся с известными физиками реальной истории, цитирование «нетривиального» ответа нерадивого студента при изложении какого-либо раздела физики – позволяет сформировать побудительный мотив у студентов как для восприятия излагаемого преподавателем нового материала (см. рассмотренный выше пример), так и для дальнейшей самостоятельной работы по заданной теме.

Настоящее пособие является дополнительным материалом к общепринятым учебникам, рекомендованным для изучения курса общей физики.

Индивидуальная работа студента над дополнительными заданиями по курсу общей физики заключается в следующем.

Он должен в письменном виде представить:

- 1) комментарии к приведенному в разделе тексту с использованием формул, описывающих физические законы или явления, встречающиеся в тексте;
- 2) развернутое решение предложенной в разделе задачи.

В связи с тем, что в современном курсе общей физики не рассматривается анализ размерностей – эффективный метод для решения задач, в данном пособии приведены основные теоретические сведения для самостоятельного изучения этого метода как в теоретическом, так и в практическом плане. При анализе размерностей рассмотрена возможность использования «векторных» единиц длины.

Автор выражает благодарность Андрею Альбертовичу Гришаеву, автору сайта newfiz.narod.ru, разрешившему использовать в данном учебном издании избранные страницы из замечательного цикла статей по физике, написанных в шуточной форме О.Х. Деревенским.

ГЛАВА 1. МЕХАНИКА

1.1. Системы отсчета

Е.Л. Фейнберг вспоминает, что однажды И.Е. Тамм сказал ему, что если бы Пушкин жил в наши дни, он был бы физиком. И, прочитав наизусть стихотворение «Движение»:

*Движенья нет, сказал мудрец брадатый.
Другой смолчал и стал пред ним ходить,
Сильнее бы не мог он возразить;
Хвалили все ответ замысловатый,
Но, господа, забавный случай сей
Другой пример на память мне приводит:
Ведь каждый день пред нами солнце ходит,
Однако ж прав упрямый Галилей –*

добавил с восхищением: «Какое понимание относительности движения, недостоверности очевидного!»

Галилей опубликовал «Диалог о двух системах мира – птолемеевой и коперниковой». Вторая из этих систем была жуткой ересью, поскольку в ней, в частности, утверждалось, что Земля вращается вокруг Солнца – вопреки очевидному опыту. За это уже можно было поплатиться жизнью, как Джордано Бруно. Поэтому для того, чтобы и народ смутить, и себя обезопасить, хитроумный Галилей пустился на следующий маневр. В предисловии к «Диалогу» он отметил, что – ничего подобного, он вовсе не разделяет взглядов Коперника, а просто, так сказать, приводит их в дискуссионном порядке, чтобы, дескать, широкая публика узнала обо всей этой гнусной ереси, для чего, собственно, он и написал книгу не на мудреном латинском, а на популярном итальянском языке... На суде инквизиции Галилей признался, что, увлекшись, он способствовал распространению учения Коперника. Грязное судилище приговорило его к ссылке во Флоренцию (!), где он, воя за нос надзор инквизиции, работал до конца своих дней.

1.2. Кинематика

Галилей прославился тем, что, перегнувшись через перила верхнего яруса башни в Пизе, сбрасывал в прохожих различные предметы (башня из-за этого стала постепенно крениться в сторону, с которой у него было излюбленное местечко для этих занятий, и стала «падающей»). При этом самым интересным, конечно, был выбор правильного упреждения. Вот здесь-то, обратите внимание, и можно понять, что такое мыслитель. Другой на месте Галилея поразвлекался бы, и только. А вот Галилей, разобравшись с упреждением, подарил миру, во-первых, открытие, что тела разной массы падают все-таки с одинаковым ускорением, а во-вторых, идею о прямолинейном и равномерном движении – при отсутствии внешних воздействий.

Полицейский останавливает машину и говорит женщине, сидящей за рулем: «Мадам, вы нарушили правила уличного движения. Вы ехали со скоростью 90 километров в час». Женщина отвечает: «Простите, это невозможно! Как я могла делать 90 километров в час, если еду всего лишь 7 минут!»

1.3. Динамика

1.3.1. Силы в механике

Как повествует легенда, Гиерон, тиран Сиракуз, заказал Архимеду проверить, сделана новая корона из чистого золота или в ней есть примеси. Самый простой способ определить, состоит ли некий предмет из золота, заключается в сравнении его веса с весом золотого слитка того же объема. Но замысловатая форма царской короны не позволяла провести этот эксперимент напрямую. Вариант расплавить корону, по понятным причинам, отпадал. Решение пришло в голову Архимеду, когда он принимал ванну в общественных банях. Наблюдая за водой, переливающейся через край ванны, ученый заметил, что чем больше он погружается в воду, тем больше воды выливается из ванны!

А значит, для выполнения приказа царя достаточно определить, какой объем воды вытеснит погруженная в воду корона. Архимед был так воодушевлен своим открытием, что выбежал на улицу голый и с криками «Эврика, эврика!» (что в переводе с древнегреческого означает «Нашел, нашел!») бросился домой.

Задача 1. В банке с водой плавает тело массой m . Плотность тела равна $2/3$ плотности воды. Затем с помощью тонкого стержня его полностью погружают в воду, прикладывая силу F . Каково наименьшее значение этой силы?

Задача 2. Что тяжелее: тонна сена или тонна железа?

Задача 3. Что является физической причиной подъёма над землей аэростата, ракеты, самолета, зенитного снаряда?

1.3.2. Законы Ньютона

Преподаватель: Расскажите о законах Ньютона.

Студент-заочник пишет формулу $F_1 = - F_2$ и комментирует ее следующим образом: F_1 – это сила из первого закона Ньютона, F_2 – это сила из второго закона Ньютона, а вот почему минус, хоть убейте, не знаю!

Студент-физик увлёкся религией и перевёлся в семинарию. Вот сидит он на лекции и подрёмывает. Батюшка по ходу лекции подходит к нему и спрашивает:

– Итак, скажите, что такое Божественная сила?

– Божественная масса на Божественное ускорение.

(Заметим в скобках, что ответ неправильный, так как получается Божественность в квадрате! Надо или Божественная масса на ускорение, или масса на Божественное ускорение).

Перед тем, как закон всемирного тяготения был открыт, у него была ещё предыстория. Понимаете, какое дело: наука строится только на фактах. И поскольку никакой технической документации по сотворению физического мира не отыскалось, современная наука полагает, что этот дивный мир возник и устаканился сам собой. «До того, как что-нибудь было, – говорит она, – ничего не было. Ни тебе пространства, ни времени, ни тебе полей, ни частиц. Была только мерзость запустения и одна-единёшенька сингулярность на этой мерзости – как бы вечная и как бы бесконечная. Была она себе, была, никого не трогала...» И вдруг случился с ней казус, который по-научному называется «первотолчок». С непривычки бабахнула сингулярность так, что из неё потекло и посыпалось всё сразу: и время, и пространство, и поля, и частицы. По мере того, как молодая и горячая Вселенная остывала на лету, расширяясь в запространственные дали, потихоньку-полегоньку утряслись сами собою физические законы, в том числе и закон всемирного тяготения. Вот теперь оставалось только открыть его.

Когда пишешь на века, то почему-то остро воспринимаешь критику по поводу этой писанины. Ох, как же остро воспринимал критику Ньютон! Не дай бог каждому. Поэтому физики, познакомившиеся с его трудами, словно сговорившись, срывались с цепи: каждый норовил если уж не раскритиковать Ньютона, так хотя бы оспорить его приоритет. Это был настоящий кошмар; сколько раз Ньютон зарекался: «...либо не следует сообщать ничего нового, либо придется тратить все силы на защиту своего открытия», столько же раз он упорно брался за свое, не щадя всех сил. И каждый раз его опять чуть не доводили до конвульсий. Особенно старался Гук, одно время бывший секретарем Королевского общества, да Гюйгенс. Едва Ньютон пришлет в Королевское общество рукопись с изложением закона всемирного тяготения, так сразу Гук возьмет да и вспомнит не-

кстати, что именно об этом он в свое время и писал в письме Ньютону. Из-за этого-то Королевские общественники задержали публикацию знаменитых ньютонических «Математических начал натуральной философии», сославшись, смешно сказать, на напряженку с финансами! «Знаем мы вашу напряженку, – плевался Ньютон – Это все, небось, Гук там напрягается! Ах, впрочем, гипотез же я не измышляю...»

Профессор МФТИ В.В. Смилга, принимая экзамен у симпатичной студентки, спросил: «Кто такой Роберт Гук?» Студентка не очень уверенно ответила: «Это, вроде бы, замдекана, вот только не помню, какого факультета. А к чему это вы?»

1.4. Работа, энергия, мощность

Взять хотя бы случай Уатта – мощный был мужик! Как лошадь. Собственно, потому он и предложил соответствующую единицу мощности – лошадиную силу. Сразу видать, что по себе судить привык. Уязвленные коллеги, естественно, не долго медлили с ответными мерами. Сговорившись, они сконструировали единичку мощности – так себе, раз в семьсот меньшую, чем лошадиная сила, и назвали ее ради хохмы в честь Уатта! Не высовывайся-де в другой раз. Кстати, в русскоязычных научных кругах эта единичка зовется вовсе не «уатт», она зовется «ватт», чтобы не путаться.

Задача. Перевести в СИ 1 лошадиную силу (1 л.с.).

1.5. Законы сохранения

А в семнадцатом веке, можете себе представить, у Декарта было значительное количество последователей – картезианцев. Особенно картезианцы прославились в связи с долгой и бурной «полемикой о живой силе», где они насмерть стояли за то, что

при столкновениях тел сохраняется не абы что, а количество движения. Их супротивники, предводительствуемые Лейбницем, настаивали на сохранении кинетической энергии, а не чего-нибудь там еще, извините за выражение. Поскольку уступать никто не хотел, словесные баталии частенько переходили в экспериментальные проверки, в ходе которых тела сталкивались со страшной «живой силой». Наконец Даламбера осенило: чтобы не было обидно ни тем, ни другим – нехай сохраняется и количество движения, и кинетическая энергия; не жалко, мол. Услышав об этом, соперники тут же пожалы руки и разошлись, приговаривая: «До чего конструктивный ум!»

Тут-то и подошло времечко открытия фундаментального закона природы – закона сохранения и превращения энергии. Физики, понимавшие, какое огромное значение будет иметь этот закон, осторожничали и не торопились с публикациями на этот счет. Тем временем доктор медицины Майер установил этот закон на основе обыкновенных клинических наблюдений. Ничтоже сумняшеся, он сразу настроил несколько работ, причем кое-что издал даже за свой счет. Но, разумеется, уважающие себя физики не читают всякую околофизическую чушь, которую сочиняют представители других специальностей. Когда Майер узнал, что закон сохранения энергии открыл, оказывается, Джоуль, а затем – ба! – еще и Гельмгольц, то он решил побороться за свой приоритет. Тут уж уважающие себя проявили надежную профессиональную солидарность и, не напрягаясь, затравили возмутителя спокойствия до тяжелого нервного расстройства.

Немецкий физик А. Зоммерфельд остроумно отметил, что жидкость ведёт себя гораздо умней, чем толпа людей – в узком месте и давит меньше, и проходит быстрее!

ГЛАВА 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

2.1. Молекулярно-кинетическая теория

Американский физик Р. Фейнман, лауреат Нобелевской премии 1965 года, выделил особую роль молекулярно-кинетической теории следующим образом: «Если бы в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные научные знания вдруг оказались бы уничтоженными и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, принесло бы наибольшую информацию? Я считаю, что это – атомная гипотеза: *все тела состоят из атомов – маленьких телец, которые находятся в непрерывном движении, притягиваются на небольшом расстоянии, но отталкиваются, если одно из них прижать плотнее к другому.*

В одной этой фразе содержится невероятное количество информации о мире, стоит лишь приложить к ней немного воображения и чуть соображения».

– *Что такое броуновское движение?*

– *Это движение английских рабочих за мир.*

(Такой ответ был дан студентом-заочником в советское время.)

Раз в таверне Авогадро, перебравши совсем капельку, имел неосторожность похвастаться дружку насчет остроты своего зрения – могу, дескать, различать отдельные молекулы. Дружок, хотя и не был физиком, сразу смекнул, какую из этого можно извлечь выгоду. «А слабо тебе, Амедео, пересчитать молекулы в одном моле идеального газа при нормальных условиях?» – закинул он удочку и, видя, что Авогадро клюнул, подзадорил его:

«Спорим на десять лир, что ни за что не сосчитаешь!» – «Это я-то не сосчитаю?! – загорелся Авогадро. – По рукам! Тащи сюда свой моль при нормальных условиях!» Ну, дальше сами знаете. Авогадро был очень гордый, отступать он не привык. Короче, считать ему пришлось всю оставшуюся жизнь. Число, которое получилось в итоге, теперь носит его имя – в знак признательности за этот титанический труд.

Студенты всегда любили развлекаться, демонстрируя, как велико число Авогадро ($N_A = 6,022\ 141\ 79 \cdot 10^{23}$). Таким количеством зерен воздушной кукурузы можно было покрыть Америку слоем в 15 километров, таким количеством чашек можно было бы вычерпать Тихий океан, а такое число банок прохладительных напитков, сложенных штабелями, покрыло бы Землю слоем высотой в 300 километров. Такого количества американских центов было бы достаточно, чтобы сделать каждого жителя Земли долларовым миллиардером. Поистине огромное число!

Зачетное занятие. Преподаватель: Что означает буква i в уравнении $E = \frac{i}{2} RT$?

Студентка: Это момент инерции.

Преподаватель: Неправильно.

Студентка: А что это?

Преподаватель: Не скажу. Этот вопрос мы подробно обсуждали на практическом занятии и сейчас ваша очередь сказать, что это такое.

Студентка: Сила тока.

Преподаватель: Неверно. Мы в этом семестре изучали молекулярную физику.

Студентка: Разве??? Тогда это... йод.

В «Размышлениях о причине теплоты и холода» (1744) Ломоносов достаточно ясно сформулировал причину теплоты, которая заключается *«во внутреннем движении»* частичек тела. Кстати, он сразу же сделал феноменальный вывод: *«должна существовать наибольшая и последняя степень холода, состоящая в полном покое частичек»*. Сегодня используется более высоконучный термин – «абсолютный нуль температуры», но имя Ломоносова при этом не упоминается. Он ведь имел неосторожность разгромить концепцию теплотворной материи! Так, он писал, что философы не показали – *«чем именно теплотворная материя вдруг загоняется в нагреваемые тела»*. *«Спрашиваю: каким образом в самую холодную зиму, когда всюду лютый мороз, ...порох, зажжённый малейшей внезапно проскочившей искрой, вспыхивает вдруг огромным пламенем. Откуда и в силу какой удивительной способности материя эта собирается в один момент времени?»*

Ломоносов разобрал и следующее заблуждение – насчёт весомости «теплотворной материи». «Философами, а особенно химиками, принимается, что этот блуждающий огонь показывает своё присутствие в телах не только увеличением объёма их, но и увеличением веса. Весьма известный Роберт Бойль... доказал на опыте, что тела увеличиваются в весе при обжигании». Увы, известный Роберт Бойль начудил: при обжигании металла на нём образуется окалина, и вес образца увеличивается – но за счёт вещества, присоединённого в результате окислительной реакции. Ломоносов проделал ещё и контрольные «опыты в заплавленных накрепко стеклянных сосудах, чтобы исследовать, прибывает ли вес металлов от чистого жару. Оными опытами нашлось, что славного Роберта Бойля мнение ложно, ибо без пропускания внешнего воздуха вес сожженного металла остаётся в одной мере».

Если теплота является движением отдельных молекул, которое подчиняется обратимым механическим законам, то почему же в совокупности это движение уже необратимо? Так все и походили бы с ума, если б не Больцман. Он как-то неосторожно выпустил фразочку, которая впоследствии стала крылатой: «Статистика знает все». Поэтому к нему-то и обратились – давай, мол, если такой грамотный. И, знаете, не ошиблись, этот великий комбинатор в грязь лицом не ударил! По статистике, оказывается, необратимый процесс – просто наиболее вероятный из всех возможных, то есть чудеса, в общем-то, случаются, но – чем чуднее, тем реже. Просто, как все тривиальное! Разом вернулись к жизни все бывшие пессимисты, которые рассуждали так: если тепло переходит от горячих тел к холодным... то рано или поздно все тела станут теплыми... и всем нам будет крышка... (которую они сговорились называть «тепловой смертью Вселенной»). Ясно же, что ничего чуднее этого не бывает, значит, этого не бывает никогда.

Вот уже много столетий философы, да и натурфилософы жили в ужасе перед пустотой – ведь, как завещал Аристотель, пустоты боится даже природа (кстати, именно на почве этого ужаса родилось недоброе пожелание «чтоб тебе пусто было»). И вот нашлась, наконец, лихая головушка, хозяином которой, к счастью, оказался Торричелли. Этот смельчак разработал изящный метод опустошения. Он рассудил, что если взять пробирку, заполненную ртутью, перевернуть ее в чашечку со ртутью же и убрать пальчик, прикрывающий отверстие, то ртуть из пробирки вытечет. Не желая мелочиться, Торричелли взял длинную, с метр, пробирку – чтобы уж получилось побольше пустоты; такой потребительский подход и привел, как это ни странно, к некоторому успеху. Когда пальчик был убран, ртуть и в самом деле потекла, но не вытекла вся, а издевательски остановилась на высоте «локтя с четвертью и еще одного пальца»

над уровнем в чашечке. Тем не менее «торричеллиева пустота» – вот она, а у экспериментатора не отнялись руки-ноги, и не отсох язык! «Хм, – пожал плечами Торричелли. – Тоже мне, природа. Нашла чего бояться. Ни капельки не страшно же!»

Блез Паскаль повторил опыт Торричелли во внутреннем дворике стекольного завода в Руане с двумя длинными трубками, одна из которых была наполненная вином, а другая – водой, и получил результаты, предсказанные Торричелли.

2.2. Термодинамика

Напомним про газовые законы, которые время от времени нет-нет, да и открывались. Первый закон является ровесником первых академий. Бойль и, независимо от него, Мариотт были очень важными персонами. Для пущей важности они имели обыкновение надуть щеки. Отсюда до открытия уже рукой подать. Вернее, двумя руками. В самом деле, попробуйте, надув как следует щеки, резко надавить на них кончиками указательных пальцев. Не правда ли, чем меньше объем, занимаемый некоторым количеством газа, тем больше давление этого газа? И ведь кажется – совсем просто, а поди додумайся до этого в конце XVII века.

Не прошло и 130 лет, как Шарль открыл следующий закон, гласящий, что чем выше температура газа при постоянном объеме, тем больше давление этого газа. Сегодня каждый может повторить опыт Шарля. Для этого неоткупоренную бутылку шампанского следует поставить на медленный огонь, после чего желательно укрыться понадежней.

Ну и третий закон, описывающий поведение газа при постоянном давлении, был открыт известным в свое время воздухоплавателем Гей-Люссаком. Вообще-то говоря, он всплыл на семикилометровую высоту не для того, чтобы открыть свой закон, а – так, по мелочи: проверить на всякий случай, можно ли там ориентироваться по компасу, а заодно и воздуха тамошнего набрать для последующего химического анализа. Очень уж был

он дотошный, этот Гей-Люссак – все хотел выяснить, дышат ли ангелы такой же смесью, как и мы, грешные. Однако наверху ему стало не до ангелов. Задавшись целью поддерживать постоянное давление в баллоне, он так уморительно боролся с солнцем, ветром и водой – нашими лучшими друзьями, кажется, что едва не дошел до умопомрачения. При этом закон Гей-Люссака открылся сам собой.

Когда было закончено строительство тоннеля под Темзой в Лондоне, городские власти решили отметить это событие в самом тоннеле распитием шампанского, которое чиновникам показалось лишенным обычной игривости. Зато когда они поднялись на поверхность, вино забурлило у них в желудках и стало раздувать их жилеты. Пришлось одного высокопоставленного чиновника срочно спускать обратно для рекомпрессии.

В 1802 году Ж. Гей-Люссак проводил в Париже научные опыты. Ему были нужны стеклянные трубки, которые тогда выработывались стеклодувами только в Германии. Когда ученый их выписал, французские таможенники наложили такую высокую пошлину, что он не мог выкупить посылку. Об этом узнал Александр Гумбольдт и решил помочь Гей-Люссаку. Он посоветовал отправителям запаять концы трубок и наклеить на них этикетки: «Осторожно! Немецкий воздух!» Воздух? Таможенного тарифа на воздух не существовало, и на этот раз трубки дошли до французского ученого без всяких пошлин.

На столе у Нернста стояла пробирка с органическим соединением дифенилметаном, температура плавления которого 26 °С. Если в 11 часов утра препарат таял, Нернст вздыхал: «Против природы не попрешь!» И уводил студентов заниматься греблей и плаванием.

Автор третьего начала термодинамики Вальтер Нернст в часы досуга разводил карпов. Однажды кто-то глубокомысленно заметил:

– Странный выбор. Кур разводить и то интересней.

Нернст невозмутимо ответил:

– Я развожу таких животных, которые находятся в термодинамическом равновесии с окружающей средой. Разводить теплокровных – это значит обогревать на свои деньги мировое пространство.

Преподаватель: При какой температуре замерзает вода?

Студентка молчит.

– При минус 5 °С замерзнет?

Студентка неуверенно: «Немного замерзнет...»

– А при минус 25 °С?

Студентка: Замерзнет больше!

Жозе Луи Гей-Люссак (1778–1850) – крупнейший французский химик и физик – во время одного из своих химических опытов лишился глаза. Как-то раз его встретил епископ Сиезский – самонадеянный богослов, попавший в число «бессмертных» Французской академии по протекции.

– Не понимаю, как можно быть ученым, имея всего один глаз! Что можно увидеть одним глазом?

– Да побольше вашего, – не растерялся Гей-Люссак. – Вот, например, я вижу у вас два глаза, а вы у меня только один!

Обычно историки в качестве ключевого события упоминают открытие Румфорда (1798), который в Мюнхене издевался над мастерами, заставляя их рассверливать стволы пушек тупым сверлом. «Ваша светлость, – пытался смягчить его благородные нравы старший мастеровой, – оно тупым сверлом свер-

лить труднее, да и ствол, опять же, греется, а через это калибер вниз уходит!» – «Что сверлить труднее, это я, болван, и сам знаю! А что греется... это интересно!.. Может получится очень недурно!.. Ай, молодец! Держи вот, выпей кружку пива за здоровье моей светлости!» В докладе Королевскому обществу Румфорд излагал: *«источник тепла, возникающего при трении в этих опытах, представляется, по-видимому, неисчерпаемым»* – а значит, это тепло *«не может быть материальной субстанцией»*, а должно сводиться *«к представлениям о движении»*. Сразу чувствуется намётанный взгляд проницательного исследователя. Фурор, как есть фурор! Если забыть про то, что так называемые дикари испокон веков умели добывать огонь трением (причём, несколькими способами)... если забыть про то, что вода нагревается при встряхивании сосуда, в котором она находится... если забыть про то, что Дэви, немного попыхтя, расплавил трением лёд на морозе... если забыть про труды Ломоносова, который 54 годами ранее, в тех же «Размышлениях...», писал: *«Очень хорошо известно, что теплота возбуждается движением: ...железо накаливается докрасна от проковывания частыми и сильными ударами»*... Если про всё это забыть, то открытие Румфорда было, и вправду, выдающееся. Бурные продолжительные аплодисменты!

Переход тепла от горячих тел к холодным очень досаждал, особенно Дьюару. Наступил момент, когда Дьюар плюнул, отправился в лавочку к старьевщику и разорился там на пару термосов. Проблема была решена! С тех пор благодарные физики и называют термос «сосудом Дьюара». Еще бы – ведь впоследствии он оказался настоящей находкой для физики низких температур! Ну, что без этого сосуда делал бы Каммерлинг-Оннес? Разве мог бы он позволить себе искать ответ на вполне конкретный вопрос: что выйдет, если хорошенько заморозить ртуть? А вышло вот что. Пока атомы ртути еще дрожат от холода, они худо-бедно мешают двигаться электронам, проводящим элек-

трический ток (в этом и заключается причина омического сопротивления). Но если мороз еще покрепчает, то, *се ля ви*, последняя дрожь атомов замирает, а электроны-живчики шастают, не испытывая никакого сопротивления! Это явление назвали сверхпроводимостью.

Задача 1. Как определить, какой из двух непроградуированных термометров показывает большую температуру?

Задача 2. Почему ожоги паром опаснее ожогов кипятком?

Задача 3. Почему запотевают очки, когда человек с мороза входит в комнату?

Задача 4. Почему стаканы из толстого стекла чаще, чем тонкостенные, лопаются при наливании в них крутого кипятка?

Задача 5. Два студента в столовой взяли на третье горячий чай. Один студент сразу долил сливки в стакан с чаем, а другой сначала съел первое и второе, а потом долил в чай сливки. Кто будет пить более горячий чай?

ГЛАВА 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

3.1. Электростатика

Профессор: Скажите мне, что такое электрический заряд?

Студент: Я знал, но забыл...

Профессор: Ради Бога, вспомните! Никто не знает, что такое заряд, а вы знали и забыли!

В прошлом Европа была буквально заполонена бродячими фокусниками, жанр которых совершенно не требовал традиционной ловкости рук. Вот чем покоряли публику эти шарлатаны: возьмут кусок янтаря, прошепчут замогильным голосом заклинания «айн, цвай, драй», натирая янтарь об собственный парик, и – пожалуйста, мелкие бумажки замечутся между столом и этим камешком. Я, дескать, Великий Маг, Повелитель бумажек! Публика-дура верила и, трепеща, охотно расставалась со своими сбережениями. Ну, коронованных особ, понятное дело, такой дешевкой было уже не удивить. Для развлечения этих тунеядцев изобретали механизмы, позволявшие увеличить силу магии – типа стеклянного шара, который при вращении натирался о кожаные подушечки. Затем стали применять стеклянные диски, трущиеся о мех, что дало возможность подстраивать мелкие сюрпризы. Какой-нибудь гость двора дотрагивался до безобидной с виду вещицы, и – трах! – получал легкий шок. Пока гость приходил в себя, фрейлины успевали умереть от хохота.

Сообщение в газетах: «Сегодня в Китае открыта самая большая в мире электростанция. Тысячи маленьких китайцев в шелковых штанишках съезжают по стеклянному желобу».

Вернемся к электрическим жидкостям – почему-то их сначала считали жидкостями, как и теплоту. Хотя, с другой стороны, деваться было некуда: если электричество – не газ и не твердое тело, значит – жидкость. Кулон установил, что больше всего этой жидкости содержится в кошачьем мехе. Вскоре, стоило ему выйти из дому, кошки с дикими воплями устраивались подальше и повыше. Они уже прекрасно знали, что стоит только попасться в его умелые руки, и с лишними кулонами уже не уйти. А то, что это было необходимо для науки, их совершенно не волновало. Несмотря на эти объективные трудности, Кулон проделал великолепную серию экспериментов на крутильных весах, которые специально для этого изобрел. Он их крутил и так и сяк, а в качестве морали обнаружил, что электрические капельки взаимодействуют по закону, сильно смахивающему на закон всемирного тяготения.

Тем временем сделал свое открытие и Луиджи Гальвани. Вот какой забавный случай с ним произошел. Он, видите ли, был гурман. Впрочем, гурманов и без него хватало, а вот Гальвани был еще и пижон – в этом-то сочетании все дело. Он раз потребовал, чтобы для вкушания лягушачьих лапок ему подали не какие-нибудь там серебряные ножичек и вилочку, а чтобы ножичек – ладно уж, серебряный, но зато вилочку – непременно платиновую. Официант, предвкушая развлечение, не стал спорить. Едва Гальвани тыкнул свои орудия в недожаренные лапки, как этот деликатес сделал попытку сигануть из тарелки. «Что т...т...акое?» – обомлел Гальвани. «Да вы же их просто гальванизируете, сеньор!» – объяснил ему официант, давась от смеха. Так родилась электрофизиология...

В своей анатомической Гальвани зарезал целую партию лягушек и приступил к научно поставленным опытам. Вывод он

сделал по тем временам ошеломляющий: у лягушки, дескать, есть такое же «животное электричество», как и у электрического ската. «О, времена, о, нравы! – простонал, узнав об этом, Александро Вольта, который любил животных, а лягушек – особенно. – Дело здесь не в лягушке, а в двух разных металлах!» В доказательство своих слов Вольта продемонстрировал изящный опыт, в котором он, в отличие от Гальвани, остроумно использовал вместо лягушки собственный язык. Кстати, язык для этого не требовал отрезания и препарирования, он и так хорошо работал. «И все-таки неубедительно», – возразил на это Гальвани и, чтобы доказать свою правоту, учинил над лягушкой такое, что препарированный образец трепыхался уже без прикосновений всяких там металлов. Этого Вольта уже не смог вынести, в связи с чем он и изобрел свой знаменитый столб – источник контактного напряжения. Возможно, это изобретение спасло от преждевременной кончины не одну тысячу лягушек, поскольку Гальвани подумывал об их четвертовании в промышленных масштабах, чтобы смонтировать первую в мире электростанцию – при дворе Папы Римского.

Задача 1. Положительно заряженное тело притягивает подвешенный на шелковой нити легкий шарик. Можно ли утверждать, что шарик заряжен отрицательно?

Задача 2. Иногда говорят, что линии напряженности электростатического поля – это линии, вдоль которых будет двигаться электрический заряд в электрическом поле. Так ли это?

3.2. Постоянный электрический ток

Для того чтобы как следует отметить открытие своего знаменитого вольтова столба, Вольта пригласил на кружку пива своих зарубежных друзей – Ома и Ампера. Осушив свою кружку, Вольта расчувствовался. «Друзья! – воскликнул он. – Эту нашу встречу надо увековечить!» – «И то верно, – подхватил Ампер. – А не сочинить ли нам всем вместе какую-нибудь фор-

мулку?» «Только что-нибудь попроще, – взмолился Ом, – а то я от радости плохо соображаю». – «Не беда, – сказал Вольта, – один Ампер чего стоит!» – «Один Ампер чего стоит? – задумчиво повторил Ампер. – А вот чего стоит один Ампер!» – воскликнул он и набросал свой вариант. «Вот это да! – выдохнул Вольта. – Но как же мы назовем этот – без преувеличения сказать – закон?» И здесь-то, к сожалению, друзья чуть было не перессорились! В итоге решили тянуть жребий, и Ому, как обычно, повезло.

Известный итальянский физик А. Вольта (1745–1827) был страстным любителем кофе, который он пил всегда без молока и сахара. Когда один его знакомый спросил, почему Вольта пренебрегает молоком и сахаром, знаменитый физик, улыбаясь, ответил: «Чего ж тут объяснять... Раз в чашке нет ни молока, ни сахара, значит, в ней больше кофе».

Задача 1. Что такое киловатт-час? Как правильно: кВт/ч или кВт-ч?

Задача 2. Кипятильник мощностью 1 кВт и напряжением 220 В включили в сеть 110 В. На какую мощность можно рассчитывать?

3.3. Магнитное поле

Эрстед уже давно обращал внимание, что во время гроз пахнет не только озоном, но и крупными открытиями. Он собрал богатую статистику случаев перемагничивания стрелки компаса вследствие удара молнии. Но, позвольте, господа, ведь молния – это электричество, а компас – это магнит! Значит, электричество и магнетизм как-то связаны! «Еще бы они не были связаны, – живо откликнулся Ампер. – Причем не “как-то”, а очень даже: весь ваш магнетизм – это электричество и есть!» – «Как это?» – похолодел Эрстед. Ампер немного подумал и объяснил: «Понимаете, электрический ток – это движение электри-

чества, а магнетизм – это просто кольцевые токи, и ничего больше». – «Но я надеюсь, – осторожно заметил Эрстед, – что под кольцевыми токами вы подразумеваете всего лишь токи по кольцевым проводникам, а вовсе не орбитальное движение электронов в атомах?» – «Разумеется, – улыбнулся Ампер. – Не будем забегать вперед».

Лаплас присутствовал на первой публичной демонстрации опыта Ампера. Публика уже расходилась, и Лаплас у выхода стал ждать ассистента... хлопнул его по плечу и, пристально глядя на него, спросил: «А не вы ли это, молодой человек, подталкивали провод?»

3.4. Электромагнитная индукция

Благодаря открытиям Эрстеда и Ампера лаборатория Фарадея была оборудована по последнему слову: провода-провода-проводочки, магнетики, включатели и выключатели. Гальванометры тогда были в большом дефиците, поэтому экспериментаторы нашли остроумный выход. Они наловчились проверять наличие электрического напряжения на ощупь, причем для повышения чувствительности срезали себе кожу на кончиках пальцев. В общем, жалко было на них смотреть, на издерганных. Кстати, в биографии Шерлока Холмса есть эпизодик на эту тему. «Холмс, только послушайте, что писал “Санди Телеграф” пятьдесят лет назад, – начал, как обычно, Ватсон. – Новости из Королевского института. Майкл Фарадей доказал тождественность всех видов электричества: «животного», «магнитного», гальванического, термоэлектричества, а также электричества, возникающего от трения. Как же это ему тогда удалось?» – «Элементарно, Ватсон! – без усилия объяснил Холмс. – Все они дергали одинаково!» – «Боже мой, Холмс, – проговорил обалдевший Ватсон, – неужели и это – с помощью дедукции?» – «Да, мой друг. Кстати, о дедукции. Хотите знать, что еще сделал Фарадей? Он открыл явление, которое я бы назвал электромагнит-

ной дедукцией, в честь моего метода. Но Майкл, конечно, поступил наоборот». «А еще, – произнес Ватсон, – как-то раз Фарадей насыпал железные опилки прямо на силовые линии магнита, и линии натяжений в эфире стали всем очевидны!» – «Знаете, Ватсон, – прищурился Холмс, – я бы не торопился с такими фундаментальными выводами!» – и они по-дружески расхохотались.

Задача 1. Почему колебания стрелки компаса быстрее затухают, если корпус латунный, и медленней, если корпус прибора пластмассовый?

Задача 2. Размеры катушки изменили так, что ее индуктивность увеличилась в 2 раза. Силу тока в катушке уменьшили в 2 раза. Изменилась ли энергия магнитного слоя катушки?

ГЛАВА 4. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

4.1. Механические и электромагнитные колебания

Немецкий физик Макс Лауэ отметил связь периода колебаний с силой тяжести следующим образом: «Маятниковые часы – это не просто ящик, который вы покупаете в магазине; маятниковые часы – это тот ящик, который вы купили вместе с самой Землей».

Задача. Опишите поведение математического маятника, колеблющегося в лифте, если лифт начал падать свободно? А если маятник был пружинный?

Допплер находил гармонию не только в вальсах и опереттах, но и в паровозных гудках, которые изменяли тон, когда поезд пролетал мимо. Эта музыкальная идиллия оборвалась, когда Допплер случайно узнал, что для машиниста тон этих же гудков постоянен. Тут-то и замаячил проклятый вопрос: на самом ли деле изменяется тон, или это только кажется? Проще говоря, физический ли это эффект, или – лечиться надо? Лечиться, понятное дело, не хотелось: хлопотно это, да и накладно. Пришлось придумать теорию, по которой выходило, что эффект – вполне физический. Только было несолидно выдвигать уши на роль измерительного прибора, поэтому явление Допплера, известное каждому привокзальному мальчишке, было экспериментально подтверждено лишь несколько лет спустя.

Встречает физик своего товарища, тот ему говорит: Мне тут такой классный анекдот рассказали: «Бежит мышка по краю обрыва: пи-пи-пи-а-а-а!!!»

– Ну и что особенного – обыкновенный эффект Доплера, – отвечает физик.

Американский физик Роберт Вуд смастерил из твёрдого картона конический рупор – мегафон длиной чуть меньше трёх метров и диаметром раструба в 60 сантиметров. Выставив его из окна квартиры приятеля, он насмешливыми репликами приводил в изумление одиночных прохожих и полисменов, находящихся за два квартала от него. Те на пустынных улицах слышали в сумерках как бы голос с неба.

4.2. Электромагнитные волны

Эстафету от Фарадея подхватил Максвелл. Он поставил себе благородную по тем временам цель – построить механическую модель эфира. Понимаете, Эйнштейн тогда еще не появился на свет, поэтому Максвелл по простоте своей считал, что электромагнитные волны – это механические упругие волны в эфире. Причем эфир, несмотря на завет мудрого Демокрита, считался сплошной средой, ибо если был бы он дискретным, то не потянул бы он роль посредника. Тут, понимаете, дело принципа: либо заряды взаимодействуют через пустоту, либо через посредника.

И если уж выбираешь посредника, так будь добр, чтобы насчет пустот – ни-ни! Вот Максвелл и старался. Обладая богатой фантазией, он придумывал разные там колесики, звездочки, шестереночки. Почти все было как в сказке: дерни, деточка, за один зарядик – он крутанет ближайшие колесики, которые в свою очередь заденут за шестереночки – соседний зарядик и сдвинется. Но – на тебе! – между колесиками и шестереночками всегда оставались, будь они неладны, промежуточки. И так – несколько раз! Когда Максвелл дошел до остервенения, его посетила гениальная мысль. «Все эти колесики, – подумал он, – нужны лишь для того, чтобы записать уравнения движения эфира. Получи я уравнения для его механических натяжений – потом на эти колесики с промежуточками начхать я хотел, эфир будет как бы сплошным!»

Когда Максвелл получил свои уравнения, то-то поначалу было радости у коллег! Один из них, помнится, воскликнул: «Не боги ли начертали эти уравнения, до чего красиво!» Он не догадывался, что из этой красоты получится дальше. А получилось из нее, сами понимаете, значение скорости электромагнитной волны в эфире. Но раз уж имеет место скорость волны, то логично предположить, что имеет место и сама волна, не так ли? Кстати, следует принимать во внимание, что, говоря об электромагнитных волнах, Максвелл и его современники имели в виду волны, мягко говоря, радиодиапазона, а отнюдь не видимый свет. Свет и радиоволны неспроста считались тогда двумя принципиально различными феноменами – ведь о свете не имели представления разве только слепцы, а что касается радиоволн, так их еще даже не открыли. Можете вообразить, как екнули сердечки физиков, когда с легкой руки Максвелла скорость этих еще не открытых радиоволн с какой-то стати практически совпала со скоростью света, которую тогда уже измерили и Физо, и Фуко, и все остальные, кому не лень. В принципе, конечно, оставалась возможность одного из двух: либо перемудрил Максвелл, либо недомудрили Физо, Фуко и все остальные, кому не лень. А если нет? Вдруг это совпадение – неспроста? Короче, срочно потребовалось, открыв радиоволны, измерить их скорость, да поточнее. И так как свято место долго пусто не бывает, то Герц-молодец тут и отличился. Подумать только – оказалось, что эти волны шастают табунами, особенно во время гроз: стоило молнии шваркнуть, детекторы этими волнами буквально захлестывало!

В городке Ульме в семье скромного предпринимателя Германа Эйнштейна – большая радость: родился мальчик! Довольный акушер, укладывая чемоданчик, – ой! – нечаянно разбил какую-то склянку, и резкий запах распространился по комнате. «Ах, извините, – засуетился акушер, – я эфир раскокал...» –

«Что-о?! – вдруг отчетливо заговорил младенец. – О чем там лопочет этот самозванец? Эфир-р-раскокаю я, понял?» Домочадцы остолбенели, но дальнейшее развитие Альберта Германовича протекало нормально.

Рентгеновские лучи открыл Рентген. Главная штука, он совсем не надрывался-то: впихнул на путь потока электронов какую-то болванку; а лучи из нее сами поперли, просвечивая все на своем пути. Естественно, такое открытие нашло применение сразу же.

Как-то Рентген получил курьезное письмо: незнакомый просил его прислать несколько рентгеновских лучей, объяснив как ими пользоваться. Оказалось, что у него в грудной клетке застряла пуля, но приехать к Рентгену он не может из-за нехватки времени.

Рентген был человек с юмором и ответил на письмо так: «К сожалению, икс-лучей у меня сейчас нет. К тому же пересылать их – дело весьма сложное. Сделаем так: пришлите мне вашу грудную клетку».

4.3. Скорость света

У Допплера все основано на том, что скорость звука фиксирована *только относительно среды*, в которой он звучит. Физо, решив, что свет в этом отношении ничем не хуже звука, лихо распространил принцип Допплера и на него. А чего, спрашивается, не распространить – ведь тогда считалось, что есть и светонесущая среда, эфир так называемый, который от хорошей жизни выдумали сторонники волновой теории света.

Как только не ерзали в эфире экспериментаторы, скорость света все равно вела себя так, словно она какая-нибудь из себя фундаментальная постоянная. Обычно это описывают так: два опытных наблюдателя – стоящий на перроне и едущий в поезде – измеряли скорость света вдоль рельсов и получали одно и то же значение. «Абсурд! – ломали головы наблюдатели. – Взять хотя

бы летящую ворону. Ну не может она лететь с одной и той же скоростью относительно нас обоих! Чем же свет отличается от вороны?» Скажу по секрету, что отличие было существенное: ворона-то, само собой, летела в каком-то одном направлении, например, по ходу поезда, а вот свет, скорость которого там измеряли, обязательно летел и по ходу, и против – туда-сюда, понимаете? С вороной никто в таком режиме не экспериментировал, поэтому чертовщина продолжалась... И сказал Эйнштейн: «Эх, господа, нашли над чем голову ломать – лично я, дескать, это просто постулирую». Заслышав такие речи, физики – как бы это помягче выразиться – временно потеряли дар соображения. «Все гениальное просто, но не до такой же степени», – говорили они. Наконец они пришли в себя: «Позвольте, но ваша теория ничего не говорит о том, как ведет себя свет по отношению к эфиру!» К такому повороту событий Эйнштейн был готов. «Это потому, – объяснил он, – что никакого эфира нет. Если бы он был, я обязательно сказал бы на этот счет пару слов. А нет – увольте».

4.4. Переменный ток

Идет зачет по электротехнике.

Преподаватель студенту:

– Расскажите мне про трехфазную цепь.

Студент:

– Ну, трехфазная цепь состоит из трех проводов.

– Правильно. Дальше.

– По первому проводу течет ток, по второму течет напряжение, а по третьему – косинус φ .

– Как?!

– Косинусом вперед!

Задача. Как меняется частота колебаний контура, если сближать пластины плоского конденсатора, включенного в колебательный контур?

ГЛАВА 5. ОПТИКА

5.1. Геометрическая оптика

Задача. Когда мы смотрим в вогнутую сторону блестящей ложки, то видим перевернутое изображение своего лица. Когда мы смотримся в вогнутое зеркало для бритья, то видим свое увеличенное неперевернутое изображение. Почему получаются два столь различных эффекта?

5.2. Волновая теория света

Профессор: *Расскажите-ка нам отличие волновой от корпускулярной теории света.*

Студентка: *Я не Света, я Наташа.*

В 1818 году О. Френель представил на конкурс Парижской академии наук мемуар о дифракции, который рассматривался комиссией, состоящей из Лапласа, Био, Пуассона и других известных ученых. Пуассон заметил, что из теории Френеля следует, что в центре геометрической тени непрозрачного диска надлежащего размера должно наблюдаться светлое пятно, что противоречило здравому смыслу! Комиссия предложила Френелю доказать экспериментально такой вывод из его теории дифракции. Френель блестяще доказал, что «здравый смысл» в этом случае ошибается. В историю физики этот факт вошел под названием «пятно Пуассона».

Научное творчество Ломоносова очень не нравилось умникам – как отечественным, так и импортным. Умничанье вообще является характерной чертой тупиковых времен, когда работы пишутся так, чтобы они были «понятны только специалистам». При этом специалистом считается тот, кто делает вид, что они ему понятны. Так вот, Ломоносов не мудрствовал лукаво. «Природа весьма проста, – приговаривал он, – что этому

противоречит, должно быть отвергнуто». И его слова не расходились с делом: он обнажал неувязочки умников, а также излагал свое разумение буквально «на пальцах». Вот так, по-деревенски, он доехал до того, что свет не может быть потоком частиц, а является процессом передачи колебательного движения частичек материи посредством волн в эфире. Однако видите ли, авторитет Ньютона был дюже велик. Поэтому Юнг да Френель подхватили крамолу Ломоносова о волновой теории света лишь спустя полвека, ну и спустя еще столько же она стала господствующей.

5.3. Квантовая теория света

Сначала Кирхгоф, затем Стефан с Больцманом и Вин (а уж затем и все остальные) никак не могли взять в толк – чего это ради черное тело излучает именно по-черному. Тут необходимо небольшое пояснение насчет черного тела. Чтобы получить представление о таковом, совсем необязательно барахтаться в саже. Или глядеть в дырочку, просверленную в металлической сфере, как это советуют лихие популяризаторы. Все проще: разуйте глаза, и только; черные тела-то – вот они! Например, Солнце – это «абсолютно черное тело при температуре 6000 К», или другие звезды – это «абсолютно черные тела с температурой до 20 000 К». В сравнении с этими гигантами черноты какая-нибудь там электрическая дуга – это просто пшик несерьезный. Здесь неискушенный в физике читатель может удивиться: как это, Солнце и звезды – черные тела? А ведь все именно так. Дело в том, что физики говорят не просто о «черных телах», а об «абсолютно черных телах». А поскольку абсолютный идеал недостижим, то и приходится иметь дело лишь с приближениями к идеалу, лучшими из которых и являются Солнце, звезды и т.п. Так вот, почему они все-таки излучают по-черному? «А не потому ли, – догадался Планк, – что атомы излучают не непрерывно, а порциями? Квантами, попросту говоря. А?»

На экзамене по физике профессор пишет уравнение $E = h\nu$ и спрашивает студента: «Что такое ν ?» – «Постоянная планки!» – «А h ?» – «Высота этой планки!»

Задача. Почему мел выглядит среди раскаленных углей темным?

Физики организовали в Брюсселе междусобойчик, который назвали Сольвеевским конгрессом. А почему Сольвеевским, а не Брюссельским? Да просто господин Сольвей, по такому случаю вызвавшийся оплатить все расходы на койко-места и сосиски с капустой, очень хотел, чтобы физики всегда помнили его доброту (это я на всякий случай напомнил, а то вдруг там кто-нибудь забыл).

Итак, леди (мадам Кюри) и джентльмены, прошу встать – Сольвеевский конгресс идет! Прошу садиться. Слушается доклад о поведении кванта, находящегося в акте испускания упомянутого кванта атомом. В разгар прений по ключевому вопросу – сколько же времени длится этот «акт испускания» – Эйнштейна, как обычно, озарило: «Господа! А ведь, ей-богу, лучше, если он вообще не длится, а осуществляется мгновенно! Раз, и все! Ведь если он длится конечное время, то все кто попало начнут от праздности умножать это время на скорость света и получать в результате длину кванта. А разве, хе-хе, бывает у кванта длина? Если бывает, то все кто попало начнут себе прикидывать, сколько же на этой длине укладывается длин волн. Хотя и ежу понятно, что никак не меньше десятка. Так эти длины волн, говорят, бывают аж по километру штука! Ничего себе дура получится вместо кванта! Вместо такой махонькой крошечки! Не зря же он квантом называется. Вот я и говорю – пусть испускается мгновенно. А то хуже будет!»

Это захватывающее предложение было с энтузиазмом принято, причем сейчас уже можно сказать, что – всерьез и надолго.

Правда, и здесь не обошлось без приключений. Никто не ожидал такой заявочки от мадам Кюри, но она с умным видом выдала в ходе дискуссии – дескать, вот вы все говорите о квантах, но для описания мгновенного испускания кванта ведь уравнения Максвелла совершенно неприменимы, так как вы на это смотрите? Переглянулись конгрессмены – конечно, неприменимы, но разве можно вслух задавать такие некорректные вопросы? Да еще на таком форуме! Дескать, женская логика, туда-сюда. Замнем, в общем. А в остальном все было просто изумительно – всем так понравилось, что конгресс постановили неоднократно повторить. Лишь Эйнштейн напустил на себя какую-то задумчивость. Ну, это понятно, он-то понимал проблему несколько глубже. Вот как, примерно: «Что-то я, действительно, того... увлекся немного с этими квантами. Мне ведь без уравнений Максвелла оставаться никак невозможно!»

Первая личная встреча Бора и Эйнштейна имела место в 1920 году. Эйнштейн никак не хотел принять дуалистическую концепцию света. В конце концов Бор сказал ему: «Ну что ж, обратитесь к германскому правительству, и пусть оно запретит дифракционные решетки и предпишет считать фотон частицей либо запретит фотоэлементы и предпишет считать свет волной».

Над дверью своего деревенского дома Бор прибил подкову, которая, согласно поверью, должна приносить счастье. Увидев подкову, один из посетителей воскликнул: «Неужели такой великий ученый, как вы, может действительно верить, что подкова над дверью приносит удачу?» – «Нет, – ответил Бор, – конечно, я не верю. Это предрассудок. Но знаете, говорят, подкова приносит удачу даже тем, кто в это не верит!»

Когда сталкиваешься с совершенно неординарным явлением, то первое, что следует сделать – это подобрать для него грамотный термин, и природа явления сразу станет гораздо понятнее. В этом случае со светом быстро отыскался восхитительный

термин «дуализм», и проблема легко и весело разрешилась. Охмелев от восторга, Луи де Бройль загнул тираду в том духе, что, дескать, вот мы спервоначалу думали про свет, что это волны, а оказалось, что здесь дуализм; но про электроны-то мы думаем, что это частицы, так вот не окажется ли, что и там – дуализм?» – «Отчего же не окажется-то, – загорелись Дэвиссон да Джермер. – Дуализм – он, брат, везде дуализм». И продемонстрировали, что в умелых опытных руках электроны ведут себя как заправские волны! «Неужели как волны?» – кисло переспросила научная общественность и добавила, что, впрочем, этого и следовало ожидать.

Задача 1. Почему существование красной границы в явлении фотоэффекта говорит в пользу корпускулярной теории света и против волновой?

Задача 2. Фотон выбивает с поверхности металла с работой выхода 2 эВ электрон с энергией 2 эВ. Какова минимальная энергия такого фотона?

ГЛАВА 6. ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

6.1. Теория атома водорода

Тем временем Резерфорд, имея весьма наивные представления о строении атома, вздумал подшутить над новеньким студентом в своей знаменитой лаборатории. В итоге он зарекся больше так не шутить, потому что студент, добросовестно выполняя это шуточное задание, получил экспериментальный результат, из которого и вытекало, что представления шефа о строении атома были наивными. Чтобы хоть как-то спасти свою репутацию, Резерфорд и предложил планетарную модель атома. Сейчас-то о ней даже школьникам говорят. А тогда это было весьма ново и удивительно, ведь теоретически вращающийся вокруг ядра электрон должен был бы так резво излучить всю свою энергию, что атом прекратил бы существование, не успев даже ойкнуть. Выручил Резерфорда молодой, подававший надежды Бор. «Знаете что, – доверительно сообщил он, – по классической теории это, конечно, удивительно. А по квантовой – обычное дело! Я уверяю вас, что у электронов в атоме есть стационарные орбиты, на которых они вертятся до тошноты, но ничегошеньки не излучают!» – «Откуда вы это знаете?» – ахнул Резерфорд. – «Господи, – воскликнул Бор, – да из моих постулатов это же прямо следует!»

Э. Резерфорд так прокомментировал результаты исследований по рассеиванию α -частиц в своем рабочем журнале: «Как будто выстрелили 15-дюймовым снарядом по папиросной бумаге, и снаряд вернулся назад и попал в вас».

6.2. Физика ядра

Знаменитый итальянский физик Бруно Понтекорво, волей судьбы оказавшийся в СССР и даже ставший академиком АН СССР, однажды заблудился в окрестностях Дубны.

Добраться домой ему помог тракторист, который поинтересовался, чем занимается его «пассажир». Понтекорво ответил: «Нейтринной физикой» (он был одним из ее создателей). Тракторист его «поправил»: «Вы хорошо говорите по-русски, но допустили ошибку. Физика не нейтринная, а нейтронная!» Позже Понтекорво, вспоминая этот случай, говорил: «Надеюсь, я доживу до времени, когда никто не будет путать нейтрино и нейтроны». В наше время академик Владимир Арнольд прокомментировал этот случай таким образом: «Сегодня люди не только ничего не знают ни о нейтрино, ни о нейтронах, но и вообще скоро никто в мире не будет знать, чем отличается треугольник от трапеции».

На экзамене по физике на вопрос, как записывается известное уравнение А. Эйнштейна, студент-заочник записал $E = mc^2$.

В 1987 году в “Американском журнале физики” вышла статья американского физика К. Адлера с названием “Папа, а масса действительно зависит от скорости?”. Вопрос, вынесенный в заглавие, был задан автору его сыном. Ответ был: “Нет!”, “Впрочем, да”, “На самом деле нет, но не говори об этом своему учителю”.

Тетка Беккереля решила сделать последнюю попытку наставить любимого племянника на путь истинный. После приличествующей случаю обстоятельной душеспасительной речи она подарила ему большой литой крест. Проводивши тетушку, беспутный племянник окинул взором кабинет в поисках подходящего места, куда бы этот подарок можно было подальше спрятать. Не найдя ничего лучшего, он сунул его в сейф (прямо на пакет с какой-то урановой солью), а сверху прикрыл нераспечатанной фотопластинкой – для верности. Ночью Беккерель проснулся в холодном поту. Ему во сне явилась тетушка и ласково попросила: «Прояви пластинку, шельмец!» – хотя Беккерель точно

знал, что она имела о фотоделе примерно такое же представление, какое он сам имел о пятом даре Святого Духа. На следующую ночь кошмар повторился. «Не отстанет ведь, душеспасительница», – понял Беккерель и, чертыхаясь, выполнил эту идиотскую просьбу. Что вы думаете – на пластинке отчетливо узнавались контуры креста! «Боже мой», – прошептал Беккерель. Еще чуть-чуть, и старания тетки не пропали бы даром; но ум ученого, зашедший за разум, нашел-таки силы вернуться в исходное положение. «Черт возьми!» – воскликнул Беккерель (это и означало открытие радиоактивности).

После одного доклада, прочитанного И.Е. Таммом на общем собрании академиков, один из академиков-гуманитариев сказал ему: «Из того, что вы много раз упоминали какие-то бета-лучи, я заключаю, что существуют также и альфа-лучи, а может быть, и гамма-лучи».

Когда один из студентов спросил у Энрико Ферми название какой-то частицы, то ответил: «Молодой человек, если бы я мог запомнить названия всех этих частиц, то я был бы ботаником!»

Задача. Что является мельчайшей частицей – носителем физико-химических свойств вещества?

6.3. Элементы квантовой механики

Но вернёмся к вероятностной интерпретации! Ведь теоретиков озарило, что вероятностный-то подход и даёт заветный ключик к пониманию сути той загадочной границы, которая разделяет классический и квантовый миры. Интересно у них получилось! В макром мире законы, как известно, проявляются через взаимно-однозначные соответствия: при конкретных начальных условиях результат выйдет тоже конкретный. Когда же исследователи пытались влезть в микромир, они неизменно на-

рывались на отсутствие однозначности. Ну, и наконец-то придумали, как из наличия однозначности получить её отсутствие: однозначные законы действуют, мол, и в микромире – но они определяют не сами физические величины, а только вероятности их значений! Вот, оказывается, почему в микромире всё так зыбко и склизко, всё расплывается и ускользает между пальцами! Вот, оказывается, откуда берётся *неопределённость*! И дело, оказывается, не в том, что по любому поводу для изменения состояния микрообъекта у него имеется богатый выбор других состояний, в которые можно перейти – с той или иной вероятностью. И какое из них реализуется в каждом конкретном случае – заранее предсказать невозможно. Нет, переход из одного чистого состояния в другое – это было бы слишком просто. Всё гораздо веселей: микрообъекты, уверяют нас, норовят пребывать в смешанных состояниях, т.е. в нескольких чистых состояниях сразу. Например, иметь сразу пять различных энергий. Или быть сразу в трёх различных местах. Ну, типа, сразу и рядом с женой, и у любовницы, и в библиотеке. Главное, чтобы у смешанного состояния сумма вероятностей пребывания во всех его чистых состояниях была равна единице. А в результате взаимодействий, мол, происходят всего лишь перераспределения вероятностей чистых состояний. Ну, типа, заедет жена сковородкой между глаз – и вероятности пребывания у любовницы и в библиотеке несколько уменьшатся. Но полная сумма всё равно останется равна единице.

ГЛАВА 7. ЕДИНИЦЫ И РАЗМЕРНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

7.1. Общие понятия о системах физических величин и системах единиц

7.1.1. Системы физических величин

Физическая величина – характеристика одного из свойств физического объекта (системы, явления или процесса), общая в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальная для каждого объекта. Например, масса тела – физическая величина, являющаяся общей характеристикой физических объектов, но имеющая для каждого объекта свое индивидуальное значение.

Анализ связей между физическими величинами показал, что эти связи не являются случайными, а имеют общий характер. В частности, было установлено, что если произвольно выбрать несколько величин, условно приняв их не зависящими друг от друга и от других величин, то остальные величины могут быть выражены через эти произвольно выбранные величины.

Физические величины могут быть экстенсивными и интенсивными. Различие между этими величинами можно выразить следующим образом: экстенсивные величины следуют закону аддитивности, интенсивные величины ему не подчиняются.

Система физических величин – совокупность взаимосвязанных физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, при этом одни величины принимаются за независимые, а другие являются функциями независимых величин.

Система величин состоит из основных и производных величин.

Выбор величин, принимаемых за основные, и их число произвольно, но практические соображения приводят к некоторому ограничению свободы в выборе основных величин. Так,

например, в СИ в качестве основных величин были выбраны длина, масса, время, сила электрического тока, термодинамическая температура, количество вещества, сила света.

Каждой основной величине присваивается символ в виде заглавной буквы латинского или греческого алфавита, в частности: длине – L , массе – M , времени – T , силе электрического тока – I , температуре – θ , количеству вещества – N , силе света – J . Эти символы входят в название системы физических величин. Так, например, система величин, на основе которой строится Международная система единиц (СИ), называется системой величин $LMTI\theta NJ$.

При построении системы физических величин подбирается такая последовательность определяющих уравнений, в которой каждое последующее уравнение содержит только одну новую производную величину, что позволяет выразить эту величину через совокупность ранее определенных величин, в конечном счете – через основные величины данной системы величин. Это условие приводит к установлению некоторой очередности и последовательности образования производных величин. Так, скорость v определяют как отношение пути ds , пройденного за интервал времени dt , к этому интервалу времени: $v = \frac{ds}{dt}$; ускорение a есть отношение приращению скорости dv за интервал времени dt к этому интервалу времени: $a = \frac{dv}{dt}$; силу F определяют из закона Ньютона $F = ma$ и т.д.

Основными принципами построения систем величин являются правила:

Не допускается формулировка определения основных величин через производные величины.

Из одного уравнения связи между величинами должна определяться только одна единица физической величины и ее размерность.

7.1.2. Размерность физической величины

Физические величины и их единицы с качественной стороны характеризуются размерностью.

Размерность физической величины – это выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных величин в различных степенях и отражающего связь данной величины с величинами, принятыми в данной системе величин за основные, и с коэффициентом пропорциональности, равным единице.

Это определение размерности дополнено следующими положениями:

– размерность величины следует обозначать знаком \dim (от англ. dimension – размерность), например $\dim F = LMT^{-2}$;

– понятие «размерность» распространяется и на основные величины, т.е. формула размерности основной величины совпадает с ее символом, например, $\dim L = L$, $\dim M = M$.

В системе величин, построенной на семи основных величинах (длина, масса, время, сила электрического тока, термодинамическая температура, количество вещества, сила света), размерность величины X может быть представлена в виде

$$\dim X = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \theta^{\epsilon} N^{\rho} J^{\eta}$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ – показатели размерностей величины.

Показатель размерности физической величины – показатель степени, в которую возведена размерность основной величины, входящей в размерность производной величины. Показатели размерности могут принимать различные значения: целые или дробные, положительные или отрицательные, и даже могут равняться нулю.

Можно указать следующие практические применения понятия «размерность физической величины».

Во-первых, с помощью размерностей величин можно проверить правильность физических уравнений, полученных в ходе математических преобразований. В основе такой проверки ле-

жит следующее требование, предъявляемое к любому физическому уравнению: размерности левой и правой части уравнения, связывающего различные величины, должны быть одинаковыми. Если при проверке выяснится, что размерности левой и правой части уравнения не одинаковы, то это будет означать, что в процессе математических преобразований допущена ошибка.

Во-вторых, на основе размерностей величин разработан метод установления функциональных связей между величинами – анализ размерностей, позволяющий по известным величинам, которые характеризуют некоторый физический процесс, найти с точностью до безразмерного множителя уравнение, описывающее связь этих величин между собой.

7.1.3. Выбор числа основных величин

Имеются различные мнения о произвольности выбора числа основных величин системы.

При недостаточном числе основных величин (базисе) некоторые величины, имеющие разную физическую природу, имеют одинаковую размерность.

Например, размерность работы A равна размерности момента силы \mathbf{M} относительно неподвижной точки:

$$\dim A = \dim \mathbf{M} = L^2MT^{-2}. \quad (1)$$

Для уменьшения числа совпадений размерностей у неоднородных величин предлагается учитывать векторный характер физических величин.

Действительно, многие физические величины не только характеризуются численным значением, как например, плотность $\rho = m/V$ но обладают свойством направленности, например, скорость v и момент силы относительно неподвижной точки O : $\mathbf{M} = [\mathbf{r} \times \mathbf{F}]$. При этом направление скорости совпадает с направлением перемещения, а момент силы перпендикулярен одновременно направлению силы и направлению вектора, прове-

денного из точки O в точку приложения силы. При анализе формулы размерности момента силы относительно точки $\dim \mathbf{M} = \dim \mathbf{r} \cdot \dim \mathbf{F} = \text{LLMT}^{-2} = \text{L}^2\text{MT}^{-2}$ не делается различия между символами размерности длины. Хотя величины \mathbf{r} и \mathbf{F} имеют разные направления, размерности этих величин представлены одним и тем же символом L .

Таким образом, в тех случаях, когда необходимо подчеркнуть векторные свойства физических величин, размерность длины L должна быть «разложена» по трем взаимно перпендикулярным направлениям L_x, L_y, L_z . Эти основные величины предложено назвать «векторными единицами длины», различающимися между собой индексами x, y, z .

При использовании размерностей L_x, L_y, L_z многие формулы размерностей физических величин становятся информативнее. Например, в случае движения тела, брошенного горизонтально с начальной скоростью с какой-либо высоты, тело обладает равномерной горизонтальной скоростью v_x и вертикальным ускорением свободного падения g . Обычно размерности величин v_x и g записываются соответственно в виде LT^{-1} и LT^{-2} . В случае использования «векторных единиц длины» размерность этих величин становится более информативной: $L_x\text{T}^{-1}$ и $L_z\text{T}^{-2}$.

7.1.4. Системы единиц физических величин

Система единиц физических величин – совокупность основных и производных единиц физических величин.

Основная единица – единица основной величины в данной системе единиц.

Производная единица – единица производной величины. Производные единицы определяются по уравнениям связи между величинами с числовым коэффициентом, равным 1.

7.2. Международная система единиц (СИ)

Размер основных единиц Международной системы единиц (СИ) устанавливается определением этих единиц Генеральными конференциями по мерам и весам.

В Приложении представлены множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц.

7.2.1. Основные единицы СИ

В соответствии с решениями Генеральных конференций по мерам и весам (ГКМВ), принятыми в различные годы, в настоящее время действуют следующие определения основных единиц СИ физических величин.

Единица массы – килограмм – масса, равная массе международного прототипа килограмма (решение 1-й ГКМВ в 1889 году).

Единица длины – метр – длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ доли секунды (решение XVII ГКМВ в 1983 году).

Единица времени – секунда – продолжительность $9192\,631\,770$ периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133, не возмущенными внешними полями (решение XIII ГКМВ в 1967 году).

Единица силы электрического тока – ампер – сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, создал бы между проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины (одобрено XIII ГКМВ в 1948 году).

Единица термодинамической температуры – кельвин (до 1967 г. имел наименование градус Кельвина) – $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. Допускается выражение термодинамической температуры в градусах Цельсия (резолюция XIII ГКМВ в 1967 году).

Единица количества вещества – моль – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в нуклиде углерода-12 массой 0,012 кг (резолюция XIV ГКМВ в 1971 году).

Единица силы света – кандела – сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср (резолюция XVI ГКМВ в 1979 году).

7.2.2. Единицы и размерности механических величин

В табл. 1 представлены формулы размерностей и единицы некоторых механических величин в Международной системе единиц (СИ).

Задание. Переписать табл. 1 в тетрадь и дополнить ее единицами и размерностями механических величин, которые в ней не записаны (потенциальная энергия, момент инерции тела относительно оси, угловая скорость, угловое ускорение и др.).

Таблица 1

Формулы размерностей и единицы механических величин в Международной системе единиц

Физическая величина	Формула определения	Формула размерности	Единица
Длина l	–	L	1 м (метр)
Масса m	–	M	1 кг (килограмм)
Время t	–	T	1 с (секунда)
Площадь S	$S = a \cdot b$	L ²	1 м ² (кв. метр)
Объем V	$V = a \cdot b \cdot c$	L ³	1 м ³ (куб. метр)
Плотность ρ	$\rho = m/V$	ML ⁻³	1 кг/м ³
Скорость v	$v = \Delta l / \Delta t$	LT ⁻¹	1 м/с
Ускорение a	$a = \Delta v / \Delta t$	LT ⁻²	1 м/с ²
Импульс p	$p = mv$	MLT ⁻¹	1 кг·м/с
Момент импульса L	$L = [r \times p]$	ML ² T ⁻¹	1 кг·м ² /с
Сила F	$F = m \cdot a$	MLT ⁻²	1 кг·м/с ² = 1 Н (ньютон)
Коэффициент упругости k	$k = F_{\text{упр}} / \Delta x$	MT ⁻²	1 Н/м (ньютон на метр)
Давление p	$p = F / S$	ML ⁻¹ T ⁻²	1 Н/м ² = 1 Па (паскаль)
Момент силы M	$M = [r \times F]$	ML ² T ⁻²	1 Н·м (ньютон-метр)
Работа A	$A = (F \cdot S)$	ML ² T ⁻²	1 Н·м = 1 Дж (джоуль)
Мощность N	$N = A / t$	ML ² T ⁻³	1 Дж/с = 1 Вт (ватт)
Кинетическая энергия $E_{\text{кин}}$	$E_{\text{кин}} = m v^2 / 2$	ML ² T ⁻²	1 Дж (джоуль)

7.2.3. Единицы и размерности электромагнитных величин

В 1832 году немецкий математик К. Гаусс в работе «Напряжение земной магнитной силы, приведенное к абсолютной мере» сформулировал научные основы построения систем единиц как совокупности основных и производных единиц. В качестве основных он выбрал единицы длины (миллиметр), массы (миллиграмм) и времени (секунда). На основе этих трех единиц Гаусс образовал единицы магнитных величин и указал на то, что таким же образом можно выразить единицы электрических величин.

В 1851 году немецкий физик В. Вебер выразил через основные единицы – миллиметр, миллиграмм и секунду – единицу силы электрического тока, электродвижущей силы и электрического сопротивления, дополнив тем самым систему магнитных единиц электрическими единицами.

В 1861 году Британская ассоциация с целью развития наук по предложению У. Томсона создала особый Комитет по эталонам электрического сопротивления (Committee on Standards of Electrical Resistance). В него помимо Томсона вошли Максвелл, Сименс, Джоуль и другие известные физики того времени. Комитет не ограничился первоначально поставленной задачей и вскоре Комитет по эталонам электрического сопротивления стал называться Комитетом по электрическим эталонам.

В дальнейшем Комитет по электрическим эталонам предложил практические единицы не только сопротивления, но и других электрических величин, которым были даны наименования, связанные с именами ученых: омада (впоследствии эта единица была переименована в ом) – единица сопротивления, вольт – единица электродвижущей силы, фарада – единица электрической емкости (впоследствии эта единица была переименована в фарад).

В 1881 году в Париже состоялся 1-й Международный конгресс электриков, на котором была принята практическая система единиц, в которую вошли также единицы силы электриче-

ского тока и единицы электрического заряда, которые впоследствии были названы соответственно ампер и кулон.

В 1889 году в Париже состоялся 2-й Международный конгресс электриков, на котором были установлены еще три практические единицы: джоуль – единица энергии, ватт – единица мощности, квадрант – единица индуктивности (впоследствии, в 1893 году, это название было изменено на генри).

В дальнейшем решениями Международной электротехнической комиссии и Генеральных конференций по мерам и весам были установлены другие практические электрические и магнитные единицы (вебер, тесла и др.).

В 1901 году итальянский инженер Джорджи предложил систему единиц МКСА, в которой за основные единицы были приняты метр, килограмм, секунда и единица силы электрического тока – ампер.

Четвертая основная единица системы МКСА – ампер (1 А) определяется через силовое воздействие двух параллельных проводников с токами по закону Ампера, записанному в виде уравнения

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{r}. \quad (2)$$

Закон Кулона для точечных зарядов в системе МКСА имеет вид

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon r^2}. \quad (3)$$

Магнитная постоянная μ_0 в уравнении (2) и электрическая постоянная ϵ_0 в уравнении (3) имеют величину и размерность $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м и $\dim \mu_0 = \text{LMT}^{-2}\text{I}^{-2}$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и $\dim \epsilon_0 = \text{L}^{-3}\text{M}^{-1}\text{T}^4\text{I}^2$.

Магнитная постоянная μ_0 и электрическая постоянная ϵ_0 связаны между собой соотношением $\mu_0 \epsilon_0 c^2 = 1$.

Впоследствии единицы системы МКСА полностью перешли в Международную систему единиц (СИ). Единицы и размерности электрических и магнитных величин в СИ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Формулы размерностей и единицы электромагнитных величин в Международной системе единиц

Физическая величина	Формула определения	Формула размерности	Единица
Электрический ток I	–	I	1 А (ампер)
Электрический заряд Q	$Q = It$	IT	1 Кл (кулон)
Потенциал φ Напряжение U	$\varphi = A_{\infty} / Q$ $U = \varphi_1 - \varphi_2$	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	1 В (вольт)
Напряженность электрического поля E	$E = F / Q$	$LMT^{-3}I^{-1}$	1 В/м (вольт на метр)
Электрический момент диполя p	$p = Q \cdot l$	LI	1 Кл·м (кулон-метр)
Поляризованность P	$P = \sum p_i / V$	$L^{-2}TI$	1 Кл/м ² (кулон на кв. метр)
Электрическое смещение D	$D = \varepsilon_0 E + P$	$L^{-2}TI$	1 Кл/м ² (кулон на кв. метр)
Электрическое сопротивление R	$R = U / I$	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	1 Ом (ом)
Электрическая емкость C	$C = Q / U$	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	1 Ф (фарад)
Магнитная индукция B	$F = Q [v \times B]$	$MT^{-2}I^{-1}$	1 Тл (тесла)
Магнитный момент m	$m = ISn$	L^2I	1 А·м ² (ампер-кв. метр)
Намагниченность M	$M = \sum m_i / V$	$L^{-1}I$	1 А/м (ампер на метр)

Окончание таблицы 2

Физическая величина	Формула определения	Формула размерности	Единица
Напряженность магнитного поля \mathbf{H}	$\mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu_0 - \mathbf{M}$	$L^{-1}I$	1 А/м (ампер на метр)
Магнитный поток Φ Потокосцепление Ψ	$\Phi = (\mathbf{B} \cdot \mathbf{S})$ $\Psi = n\Phi$	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	1 Вб (вебер)
Индуктивность L	$L = \Psi / I$	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	1 Гн (генри)
ЭДС индукции E_i	$E_i = d\Psi/dt$	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	1 В (вольт)
Магнитодвижущая сила F_m	$F_m = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$	I	1 А (ампер)
Магнитное сопротивление R_m	$R_m = U_m / \Phi$	$L^{-2}M^{-1}T^2I^2$	1 Гн ⁻¹ (обратный генри)
Магнитная постоянная μ_0	—	$LMT^{-2}I^{-2}$	Гн/м (генри на метр)
Электрическая постоянная ϵ_0	—	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	Ф/м (фарад на метр)

Задание. Переписать табл. 2 в тетрадь и дополнить ее единицами и размерностями электромагнитных величин, которые в ней не записаны (линейная плотность заряда, плотность тока и др.).

3. Анализ размерностей – эффективный метод решения задач

Анализ размерностей позволяет найти с точностью до безразмерного множителя уравнения связи между величинами без выполнения каких-либо аналитических операций, посредством которых обычно выводятся эти зависимости.

Анализ размерностей включает в себя несколько этапов.

1. Выявление всех физических величин (параметров) X_1, X_2, \dots, X_N , определяющих неизвестную величину Y .
2. Запись величин X_i и их формул размерности.
3. Запись определяемого уравнения в виде

$$Y = C X_1^\alpha X_2^\beta \dots X_N^\sigma \quad (4)$$

где C – неизвестный числовой коэффициент; $\alpha, \beta, \dots, \sigma$ – показатели степени, которые необходимо определить.

4. Подстановка вместо величин Y, X_1, X_2, \dots, X_N формул размерностей этих величин, представленных в виде произведений символов L, M, T в соответствующий показатель степени.

5. В соответствии с основным принципом теории размерностей обе части уравнения (4) должны иметь одинаковую размерность, поэтому можно записать систему уравнений для показателя степени у каждого символа L, M, T . Решением этой системы уравнений будут значения показателей степеней $\alpha, \beta, \dots, \sigma$ из уравнения (4).

В качестве примера, позволяющего убедиться в эффективности анализа размерностей, определим период колебания математического маятника. Напомним, математический маятник (ММ) – это идеализированная система, состоящая из материальной точки массой m , подвешенной на нерастяжимой невесомой нити, и колеблющаяся под действием силы тяжести mg . Хорошим приближением ММ является небольшой тяжелый шарик, подвешенный на тонкой, длинной и плохо растяжимой нити.

Выявим величины, от которых зависит период колебаний T математического маятника, и запишем формулы размерностей этих величин в таблицу.

Величина	Обозначение	Размерность
Период колебаний	T	T
Масса тела	m	M
Длина нити	l	L
Ускорение свободного падения	g	LT^{-2}

Выразим период колебания ММ в виде уравнения

$$T = Cm^\alpha l^\beta g^\gamma, \quad (5)$$

где C – безразмерный числовой множитель.

Подставим вместо величин, входящих в уравнение (5), их размерности

$$T = M^\alpha L^\beta (LT^{-2})^\gamma \rightarrow T^1 M^0 L^0 = M^\alpha L^{\beta+\gamma} T^{-2\gamma}. \quad (6)$$

В соответствии с основным принципом теории размерностей обе части уравнения (6) должны иметь одинаковую размерность. Следовательно, можно записать следующую систему уравнений для показателей степеней у каждого символа L , M , T :

$$\begin{array}{ll} \text{для } T & 1 = -2\gamma, \\ \text{для } M & 0 = \alpha, \\ \text{для } L & 0 = \beta + \gamma. \end{array}$$

Решением этой системы уравнений будут значения показателей степеней:

$$\alpha = 0, \beta = \frac{1}{2}, \gamma = -\frac{1}{2}. \quad (7)$$

Подставим числовые значения α , β , γ из уравнения (7) в уравнение (5) и получим выражение для периода колебаний математического маятника

$$T = C \sqrt{\frac{\ell}{g}}. \quad (8)$$

Точное выражение для периода колебаний ММ, полученное аналитическим путем, имеет вид:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}. \quad (9)$$

Таким образом, не производя аналитических вычислений, мы получили искомую зависимость с точностью до безразмерной константы.

Без доказательства приведем условие единственности решения, полученного посредством анализа размерностей:

Если имеется N физических величин, между которыми нужно установить уравнение связи, а число размерностей основных величин равно K , то при выполнении условия $N - K = 1$ уравнение (4) будет иметь единственное решение.

Рассмотрим задачу, в которой это условие не выполняется.

Требуется определить дальность полета пули S , выпущенной с начальной скоростью v в горизонтальном направлении на высоте h от земли.

Предположим, что дальность полета S зависит от величин v , h , g .

Заполним следующую таблицу:

Величина	Обозначение	Размерность
Дальность полета	S	L
Начальная скорость	v	LT^{-1}
Начальная высота	h	L
Ускорение свободного падения	g	LT^{-2}

Представим искомую зависимость в виде уравнения

$$S = Cv^\alpha h^\beta g^\gamma, \quad (10)$$

где C – безразмерный числовой множитель.

Подставим вместо величин, входящих в уравнение (10), их размерности:

$$L = (LT^{-1})^\alpha L^\beta \cdot (LT^{-2})^\gamma \rightarrow L^1 T^0 = L^{\alpha+\beta+\gamma} T^{-\alpha-2\gamma}. \quad (11)$$

Запишем следующую систему уравнений для показателей степеней у каждого символа L и T:

$$\begin{aligned} \text{для L} & \quad 1 = \alpha + \beta + \gamma, \\ \text{для T} & \quad 0 = \alpha - 2\gamma. \end{aligned}$$

Полученная система из двух уравнений с тремя неизвестными α , β , γ не имеет решения. Поэтому приходится выразить два неизвестных через третье:

$$\alpha = \alpha, \beta = 1 - \frac{\alpha}{2}, \gamma = \frac{\alpha}{2}. \quad (12)$$

Подставим числовые значения α , β , γ из уравнения (12) в уравнение (11) и получим выражение для дальности полета пули

$$S = Ch \left(\frac{v}{\sqrt{gh}} \right)^\alpha. \quad (13)$$

В этой задаче формулы размерности четырех величин S , v , h , g ($N = 4$) выражены через два символа размерности L и T ($K = 2$), поэтому полное решение получить невозможно.

Число величин N увеличить нельзя, а вот число основных размерностей K увеличить можно. Для этого воспользуемся «векторными единицами длины» L_x , L_y , L_z (см. подразд. 7.1.3). В этом случае величины v , h , g будут иметь размерности $\dim v = L_x T^{-1}$, $\dim h = L_z$, $\dim g = L_z T^{-2}$.

Составим таблицу:

Величина	Обозначение	Размерность
Дальность полета	S	L_x
Начальная скорость	v	$L_x T^{-1}$
Начальная высота	h	L_z
Ускорение свободного падения	g	$L_z T^{-2}$

Подставим данные таблицы в уравнение (10) и получим

$$L_x = (L_x T^{-1})^\alpha L_z^\beta (L_z T^{-2})^\gamma \rightarrow L_x^1 L_z^0 T^0 = L_x^\alpha L_z^{\beta+\gamma} T^{-\alpha-2\gamma}. \quad (14)$$

Запишем следующую систему уравнений для показателей степеней у каждого символа L и T :

$$\begin{aligned} \text{для } L_x & 1 = \alpha, \\ \text{для } L_z & 0 = \beta + \gamma, \\ \text{для } T & 0 = \alpha - 2\gamma. \end{aligned}$$

Полученная система из трех уравнений с тремя неизвестными α , β , γ имеет точное решение:

$$\alpha = 1, \beta = \frac{1}{2}, \gamma = -\frac{1}{2}. \quad (15)$$

Подставим числовые значения α , β , γ из уравнения (15) в уравнение (10) и получим выражение для дальности полета пули с точностью до постоянной

$$S = C \upsilon \left(\sqrt{\frac{h}{g}} \right). \quad (16)$$

Нетрудно убедиться, что при использовании «векторных единиц длины» число основных размерностей (L_x , L_z , T) возросло до $K = 3$, и поэтому полученное решение является единственным.

Задание. Посредством анализа размерностей решить следующие задачи.

1. Определить период колебаний физического маятника.

2. Пуля выпущена с начальной скоростью υ и под углом α к горизонтальной плоскости. Требуется определить дальность полета пули S (следует использовать «векторные единицы длины» при записи горизонтальной и вертикальной составляющих скорости пули).

3. Решить эти задачи аналитическим методом и сравнить полученные результаты с решениями с применением анализа размерностей

Рассмотрим решение следующей задачи.

Электрон влетает со скоростью υ в однородное магнитное поле с индукцией B под прямым углом к линиям индукции. Найти радиус R кругового движения электрона.

Составим таблицу формул размерностей:

Величина	Обозначение	Размерность
Масса электрона	m	M
Заряд электрона	e	TI
Скорость электрона	υ	LT ⁻¹
Магнитная индукция	B	MT ⁻² I ⁻¹
Радиус окружности	R	L

Представим радиус R как функцию остальных переменных

$$R = Cm^\alpha e^\beta v^\gamma B^\sigma, \quad (17)$$

где C – безразмерный числовой множитель.

Подставим вместо величин, входящих в уравнение (17), их размерности из табл. 2:

$$L = M^\alpha (TI)^\beta (LT^{-1})^\gamma (MT^{-2}T^{-1})^\sigma \rightarrow L^1 M^0 T^0 I^0 = L^\gamma M^{\alpha+\sigma} T^{\beta-\gamma-2\sigma} I^{\beta-\sigma}. \quad (18)$$

В соответствии с основным принципом теории размерностей обе части уравнения (18) должны иметь одинаковую размерность. Следовательно, можно записать следующую систему уравнений для показателей степеней у каждого символа L, M, T, I :

$$\begin{array}{ll} \text{для } L & 1 = \gamma, \\ \text{для } T & 0 = \beta - \gamma - 2\sigma, \end{array} \quad \begin{array}{ll} \text{для } M & 0 = \alpha + \sigma, \\ \text{для } I & 0 = \beta - \sigma. \end{array}$$

Решением этой системы уравнений будут значения показателей степеней

$$\alpha = 1, \beta = -1, \gamma = 1, \sigma = -1. \quad (19)$$

Подставим числовые значения $\alpha, \beta, \gamma, \sigma$ из уравнения (19) в уравнение (17) и получим выражение для радиуса окружности, по которой движется электрон,

$$R = C \frac{mv}{eB} \quad (20)$$

Задание 1. Решить эту задачу аналитическим методом и сравнить полученный результат с решением, полученным с применением анализа размерностей.

Задание 2. Решить следующие задачи аналитическим методом и методом анализа размерностей. Сравнить результаты.

1. Найти напряженность электрического поля в точке, отстоящей на расстоянии d от заряженной бесконечной нити с линейной плотностью заряда τ .

2. Найти индукцию магнитного поля в центре витка радиуса R с током I .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физики шутят: версия 4.0. Сборник околонуучных шуток, анекдотов и реальных поучительных историй / сост. Г.М. Трунов – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та. – 2011. – 86 с.
2. Деревенский О.Х. История физики, рассказанная курам на смех. – URL: <http://newfiz.narod.ru>.
3. Трунов Г.М. Уравнения электромагнетизма и системы единиц электрических и магнитных величин: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 131 с.
4. Хантли Г. Анализ размерностей. – М.: Мир, 1970. – 175 с.
5. Бриджмен П.В. Анализ размерностей. – Л.: ОНТИ – ГТТИ, 1934. – 128 с.
6. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 1: учеб. пособие. – М.: Мир, 1966. – 296 с.
7. Льюис М. История физики. – М.: Мир, 1970. – 464 с.
8. Подольный Р. Нечто по имени ничто. – М.: Дет. лит., 1987. – 256 с.
9. Пономарев Л.И. Под знаком кванта. – М.: Наука, 1989. – 368 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Единицы	Множитель	Наименование приставки	Обозначение
Кратные	10^{24}	уоита	У
	10^{21}	зепта	З
	10^{18}	экса	Э
	10^{15}	пета	П
	10^{12}	тера	Т
	10^9	гига	Г
	10^6	мега	М
	10^3	кило	к
	10^2	гекто	г
	10^1	дека	да
Дольные	10^{-1}	деци	д
	10^{-2}	санти	с
	10^{-3}	милли	м
	10^{-6}	микро	мк
	10^{-9}	нано	н
	10^{-12}	пико	п
	10^{-15}	фемто	ф
	10^{-18}	атто	а
	10^{-21}	зето	з
	10^{-24}	уото	у

Электронное учебное издание

ТРУНОВ Геннадий Михайлович

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ
ПО КУРСУ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ**

Корректор *В.В. Мальцева*

Подписано в печать 25.11.11 Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 3,75. Учебное издание. Заказ № 222/2011.

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33.