

А. В. Бармасов, В. Е. Холмогоров

Курс общей физики для природопользователей Электричество



bhv®



**Бармасов А. В.
Холмогоров В. Е.**

Курс общей физики для природопользователей Электричество

под ред. А. П. Бобровского

Допущено Научно-методическим советом по физике
Министерства образования и науки Российской Федерации
в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся
по естественно-научным и техническим направлениям и специальностям

Санкт-Петербург
«БХВ-Петербург»

2010

УДК 530.1(075.8)
ББК 22.3я73
Б24

Бармасов, А. В.

Б24 Курс общей физики для природопользователей.
Электричество / А. В. Бармасов, В. Е. Холмогоров / Под ред.
А. П. Бобровского. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 448 с.: ил. —
(Учебная литература для вузов)
ISBN 978-5-9775-0420-1

Книга является четвертой из серии книг полного курса общей физики для природопользователей и представляет собой расширенный адаптированный лекционный курс. Важной особенностью книги является сочетание фундаментальности и профилизации в рамках ограниченного числа лекционных часов. Профилизация курса заключается в выборе приоритетов и в иллюстрациях применения физики в геологии, биологии, почвоведении и экологии, что создает основу для изучения спецкурсов.

Изложены основные разделы курса: электростатика, электрическое поле, диэлектрики, проводники, электрическая емкость, электрический ток в металлах, электролитах, вакууме и газах, биоэлектричество, электрические свойства горных пород, принципы электроразведки.

Структура изложения удобна для подготовки к тестированию остаточных знаний в вузах. Приводятся вопросы для самопроверки.

*Для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по естественно-научным и техническим направлениям*

УДК 530.1(075.8)
ББК 22.3я73

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Татьяна Лапина</i>
Зав. редакцией	<i>Григорий Добин</i>
Редактор	<i>Алексей Семенов</i>
Компьютерная верстка	<i>Натали Смирновой</i>
Корректор	<i>Зинаида Дмитриева</i>
Дизайн серии	<i>Инны Тачиной</i>
Оформление обложки	<i>Елены Беляевой</i>
Фото	<i>Кирилла Сергеева</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 30.12.09.

Формат 70×100^{1/16}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 36,12.

Тираж 1500 экз. Заказ №

"БХВ-Петербург", 190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию № 77.99.60.953.Д.005770.05.09 от 26.05.2009 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ГУП "Типография "Наука"
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

ISBN 978-5-9775-0420-1

© Бармасов А. В., Холмогоров В. Е., 2010
© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2010

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	1
ПРИНЯТЫЕ ТЕРМИНЫ И ОБОЗНАЧЕНИЯ	7
ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА.....	17
1.1. Электрические взаимодействия. Исторический очерк	17
1.2. Электрические заряды, электростатика.....	28
1.3. Закон сохранения зарядов.....	31
1.4. Взаимодействие электрических зарядов; закон Кулона	33
1.5. Единицы измерения заряда.....	39
ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. НАПРЯЖЁННОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ	47
2.1. Электрическое поле	47
2.2. Вектор напряжённости электрического поля	48
2.3. Линии напряжённости электростатического поля и их свойства	50
2.4. Принцип суперпозиции электростатических полей; электрический диполь	53
ГЛАВА 3. ТЕОРЕМА ГАУССА	65
3.1. Вектор электрической индукции (электрическое смещение)	65
3.2. Поток вектора индукции	68
3.3. Теорема Гаусса.....	71
3.4. Поле равномерно заряженной бесконечной плоскости. Скачок нормальной составляющей вектора E на заряженной поверхности	76

3.5. Поле между двумя параллельными бесконечными равномерно заряженными плоскостями	79
3.6. Поле шарового конденсатора	81
3.7. Поле равномерно заряженной сферы	82
3.8. Поле равномерно заряженного цилиндра	83
3.9. Поле шарового слоя.....	84
3.10. Дифференциальная форма записи уравнений электростатики, уравнение Пуассона.....	85

ГЛАВА 4. ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ91

4.1. Потенциал электростатического поля; работа сил электростатического поля при перемещении заряда	91
4.2. Разность потенциалов, абсолютный электрометр	97
4.3. Связь потенциала с напряжённостью электростатического поля.....	102
4.4. Потенциалы электростатических полей, создаваемых простейшими заряженными телами.....	106
4.4.1. Шаровой конденсатор	107
4.4.2. Плоский конденсатор	107
4.4.3. Цилиндрический конденсатор.....	108

ГЛАВА 5. ДИЭЛЕКТРИКИ109

5.1. Дипольный момент молекулы	109
5.2. неполярные и полярные молекулы.....	110
5.3. Поляризация диэлектриков.....	112
5.4. Диэлектрические восприимчивость и проницаемость вещества	115
5.5. Поляризация полярных диэлектриков во внешнем электростатическом поле	118
5.6. Электростатическое поле на границе двух диэлектриков	123
5.7. Кристаллические диэлектрики. Изотропный и анизотропный кристаллические диэлектрики.....	125
5.8. Сегнетоэлектрики	126
5.9. Пьезоэлектрики	139
5.9.1. Пьезоэлектрические текстуры	144
5.9.2. Электрострикция.....	145
5.10. Пироэлектрики.....	146
5.11. Электреты, термоэлектреты, фотоэлектреты	148

ГЛАВА 6. ПРОВОДНИКИ.**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЁМКОСТЬ.....151**

6.1. Проводники.....	151
6.2. Модель металла Друде—Лоренца	153
6.3. Электроёмкость проводника.....	157
6.4. Конденсаторы.....	167
6.5. Ёмкость простых конденсаторов и двухпроводной линии.....	170
6.5.1. Плоский конденсатор	170
6.5.2. Шаровой конденсатор	171
6.5.3. Цилиндрический конденсатор	172
6.5.4. Двухпроводная линия.....	173
6.6. Размерность абсолютной диэлектрической проницаемости в СИ	173
6.7. Энергия заряженного конденсатора	174
6.8. Соединения конденсаторов	176
6.9. Энергия электрического поля системы разделённых неподвижных зарядов	177
6.10. Энергия поляризованного диэлектрика.....	181

ГЛАВА 7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ.....183

7.1. Электрический ток.....	183
7.2. Опытная проверка электронного характера проводимости металлов.....	188
7.3. Сила и плотность тока.....	190
7.4. Закон Ома	194
7.4.1. Измерение сопротивлений мостовым методом	199
7.5. Удельное электрическое сопротивление и проводимость.....	201
7.6. Опыт Стюарта—Толмена.....	206
7.7. Закон Ома в дифференциальной форме	209
7.8. Закон Джоуля—Ленца.....	210
7.9. Вывод законов Ома и Джоуля по классической теории электропроводности металлов.....	218
7.10. Закон Видемана—Франца.....	221
7.11. Электродвижущая сила	222
7.12. Сторонние источники ЭДС и внутреннее сопротивление источника ЭДС. Закон Ома для замкнутой цепи.....	224
7.13. Мощность во внешней цепи. КПД источника ЭДС	226
7.14. Правила Кирхгофа для разветвлённых электрических цепей	227
7.15. Компенсационный метод измерения ЭДС	229

ГЛАВА 8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ, В ВАКУУМЕ И В ГАЗАХ.....	233
8.1. Электрический ток в электролитах	233
8.2. Электролиз.....	240
8.3. Законы Фарадея	242
8.4. Источники тока	245
8.5. Эмиссия электронов	255
8.6. Электрический ток в вакууме; закон Богуславского—Ленгмюра (закон трёх вторых)	259
8.7. Электровакуумные приборы.....	260
8.8. Электровакуумный диод	261
8.9. Многоэлектродные лампы	263
8.10. Вольт-амперные характеристики электровакуумных ламп.....	267
8.11. Электрический ток в газах: самостоятельный, несамостоятельный и искровой разряды	275
8.11.1. Ударная ионизация	277
8.11.2. Тлеющий разряд.....	282
8.11.3. Дуговой разряд.....	286
8.11.4. Высокочастотный безэлектродный разряд.....	288
8.11.5. Нестационарные (импульсные) разряды	288
8.11.6. Коронный разряд	288
8.11.7. Искровой разряд.....	289
8.11.8. Несамостоятельная электропроводность газов.....	291
8.12. Электрические токи в атмосфере Земли.....	296
8.13. Газоразрядные источники света.....	300
 ГЛАВА 9. БИОЭЛЕКТРИЧЕСТВО. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ПРИНЦИПЫ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ.....	 307
9.1. Биоэлектричество	307
9.2. Электрические свойства горных пород	318
9.3. Диэлектрическая проницаемость горных пород	327
9.4. Поляризуемость пород	330
9.5. Принципы электроразведки.....	332
9.6. Классификация методов структурной электроразведки	336
9.7. Электрическое профилирование. Вертикальное электрическое зондирование.....	337
9.8. Электрический каротаж	339
9.9. Метод заряда	341

ПРИЛОЖЕНИЯ.....	345
Приложение 1. Справочные данные.....	347
Приложение 2. Словарь терминов, используемых в электричестве и электротехнике.....	350
Приложение 3. Краткая хронология истории электричества и электротехники.....	373
Приложение 4. Краткие биографические справки	388
Список литературы	409
Дополнительная литература	414
Предметный указатель.....	426

Предисловие

Важнейшая задача цивилизации — научить человека мыслить.

*Т. Эдисон*¹

Доводы, до которых человек додумывается сам, обычно убеждают его больше, нежели те, которые пришли в голову другим.

*Б. Паскаль*²

Трудных наук нет, есть только трудные изложения.

*А. И. Герцен*³

Книга — книгой,
А мозгами двигай.

*В. В. Маяковский*⁴

Четвёртая книга полного курса общей физики для природопользователей написана на основе лекций, читаемых авторами на протяжении многих лет в Санкт-Петербургском государственном университете и Российском государственном гидрометеорологическом университете. В книге учтены замечания и пожелания студентов биолого-почвенного факультета, геологического факультета, медицинского факультета и факультета географии и геоэкологии СПбГУ, факультета экологии и физики природной среды РГГМУ.

Книга представляет собой интегрированное учебное пособие для студентов и бакалаврантов всех форм обучения нефизических направлений и специ-

¹ Томас Альва Эдисон (Edison, 1847—1931 гг.) — крупнейший американский изобретатель.

² Блез Паскаль (Pascal, 1623—1662 гг.) — французский физик.

³ Александр Иванович Герцен (1812—1870 гг.) — русский революционер, писатель, философ.

⁴ Владимир Владимирович Маяковский (1893—1930 гг.) — русский поэт.

альностей вузов: "Биология", "Геология", "Гидрометеорология", "Почвоведение", "Природопользование", "Экология и природопользование", "Геология и геохимия горючих полезных ископаемых", "Геофизика", "Геохимия", "Геоэкология", "Гидрогеология, грунтоведение и инженерная геология", "Гидрология", "Метеорология", "Океанология", "Прикладная геохимия, минералогия, петрология", "Экологическая геология", "Экология" и близким к ним. Стоит напомнить, что направление "Рациональное природопользование" 21 мая 2006 г. утверждено Президентом РФ в качестве одного из восьми приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации.

Учебных пособий по общей физике такой профессиональной направленности и такого объёма в российской библиографии раньше не было. Авторы ставили своей целью сделать физику доступной всем, стремясь изложить полный курс общей физики максимально ясным и доступным языком. В предисловии к своему бестселлеру "Краткая история времени" один из наиболее влиятельных и известных физиков-теоретиков современности Стивен Уильям Хокинг (Hawking, род. в 1942 г.) написал: *"Мне сказали, что каждая включённая в книгу формула вдвое уменьшит число покупателей. Тогда я решил вообще обходиться без формул. Правда, в конце я всё-таки написал одно уравнение — знаменитое уравнение Эйнштейна $E = mc^2$ ".* Авторы данного пособия считают, что курс общей физики не может не использовать адекватный математический аппарат. При этом авторы стремились изложить общую физику не как набор формул, а как логичную науку, знание которой требует не столько памяти, сколько рассуждений. Отличительной особенностью изложения материала является постоянное сопоставление близких по внешним проявлениям физических явлений из разных разделов курса. Некоторые наиболее важные положения рассматриваются с разных точек зрения и приводятся в разных разделах курса. Такой подход упрощает понимание и запоминание материала.

Данное учебное пособие написано с учётом высказанных ещё в 1945 г. выдающимся российским физиком Яковом Ильичом Френкелем (1894—1952 гг.) идей о преподавании физики в вузах, основанных на его собственном гигантском опыте учёного, профессора высшей школы и автора фундаментальных учебных пособий¹. Распространённый взгляд о том, *"что студент может овладеть преподаваемой дисциплиной, не заглядывая ни в одну книгу, является совершенно неприемлемым,* — писал Френкель. — *Это при-*

¹ Френкель Я. И. Система преподавания в вузах требует пересмотра // Вестник высшей школы. — 1945. — № 4. — С. 35.

вело бы к ничем не оправданной затрате преподавателем времени — при наличии хорошего печатного курса, апробированного или составленного им (преподаватель чаще всего излагает своим слушателям один и тот же материал из года в год, а иногда и по несколько раз в один и тот же год — для разных потоков). Это также вызвало бы нерациональную затрату времени студентами, вынужденными в течение многих месяцев посещать лекции даже в том случае, если они имеют возможность ознакомиться с излагаемым материалом по книге в несравненно более короткое время... Роль профессоров и преподавателей заключается в первую очередь в организации консультаций (групповых и индивидуальных), на которых дискуссия по трудным вопросам курса, возникающая в процессе консультации, может перерасти и в лекцию". В 1960-е гг. американский физик-теоретик Ричард Фейнман (Feynman, 1918—1988 гг.) писал: "Студент должен иметь возможность обсуждать различные идеи, размышлять и высказывать свои мысли. Невозможно многому научиться, просто сидя на лекции, или даже просто решая предложенные задачи"¹. Задолго до этого российский физик Николай Алексеевич Умов (1846—1915 гг.) отмечал: "Всякое знание остаётся мёртвым, если в учащихся не развивается инициатива и самостоятельность". Авторы этого учебного пособия считают данный подход заслуживающим внимания, и при написании курса общей физики стремились создать его именно для такого подхода к преподаванию физики. Впрочем, английский историк Эдуард Гиббон (Gibbon, 1737—1794 гг.) писал: "...обучение редко приносит плоды кому-либо, кроме тех, кто предрасположен к нему, но им оно почти не нужно"...

Особенностью пособия является наличие списка принятых в данном издании терминов и обозначений, а в приложениях — справочных данных и словаря терминов (на русском и английском языках), используемых в данном разделе физики. В словаре приводятся краткие толкования основных понятий, терминов, формулировки законов и т. п., по возможности без использования математических формул. Приводимые толкования, как правило, не повторяют дословно, а скорее дополняют приводимые в тексте учебника определения. Статьи словаря представлены в алфавитном порядке.

С целью приближения "теоретической" науки к повседневной жизни в курсе даны примеры, которые могут вызвать особый интерес молодого читателя. В книге широко используется образная наглядность. Важной особенностью курса является сочетание фундаментальности и профилизации, проявившей-

¹ Фейнман Р. Дюжина лекций: шесть попроще и шесть посложнее / Пер. с англ. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. — 318 с. — С. 30—31.

ся в выборе приоритетов и в примерах применения физики в геологии, биологии, почвоведении, метеорологии, экологии и т. п. Степень освещения практических вопросов, их актуальность являются главной отличительной чертой данного учебного пособия. Именно это позволяет рекомендовать книгу самой широкой аудитории. Пособие может быть использовано студентами и преподавателями вузов и техникумов, полезно учащимся лицеев и колледжей, а также абитуриентам, готовящимся к поступлению в вузы. Структура изложения удобна для подготовки к тестированию остаточных знаний в вузах. Приводятся вопросы для самопроверки. Относительная простота и иллюстративность изложения материала, дополненные примерами из различных областей естествознания, доступными цитатами из оригинальных работ учёных и историческими ссылками, а также "выход за рамки" общей физики делают данное пособие полезным также для изучения курса "Концепции современного естествознания" студентами гуманитарных специальностей.

Другой особенностью пособия является то, что большое количество справочного материала позволяет использовать его в качестве справочника при изучении теоретического материала, выполнении лабораторных работ и решении задач. В пособии также приводятся ссылки на сайты сети Интернет, на которых читатель сможет найти дополнительную и более детальную справочную информацию.

Помимо общего списка использованной литературы в конце книги приводится литература, рекомендуемая для углублённого изучения данной темы или для написания рефератов (с учётом разных уровней подготовленности читателя — от популярной до специальной).

В разделе "Приложения" приведена краткая хронология истории развития данного раздела физики, а также краткие биографические справки.

Таким образом, авторы, отдавая себе отчёт в том, что *"никто не обнимет необъятного"*¹, пытались найти некую "золотую середину", совмещая в учебном пособии и учебник, и справочник. Делалось это осознанно, поскольку авторы понимают, что студенты нефизических специальностей хотели бы иметь одно универсальное учебное пособие по физике, пригодное как для освоения теоретического курса, так и для решения задач и выполнения лабораторных работ. Первые отклики на данный курс показали, что большинство читателей поняли и положительно оценили такое стремление авторов. Тем не менее, кому-то это пособие покажется слишком простым, а кому-то чрезмерно сложным. Некоторые посчитают его слишком объёмным, а некоторые —

¹ Козьма Прутков. Мысли и афоризмы. — 1854 г.

недостаточно подробным. Это только подтверждает тот факт, что создать действительно универсальное учебное пособие, отвечающее любым требованиям, невозможно. Авторы надеются, что в данном учебном пособии каждый студент, обучающийся по естественно-научным и техническим направлениям и специальностям, сможет найти именно то, что в данный момент ему необходимо. А авторы пытались максимально ему в этом помочь.

Данный курс соответствует требованиям, предъявляемым Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования Российской Федерации второго поколения по дисциплине "Физика" (федеральный компонент) для естественно-научных и технических направлений бакалавриата с общей трудоёмкостью 400—800 часов. Структура данного учебного пособия определяется рекомендуемым объёмом лекций по данному предмету на нефизических специальностях вузов. Как следствие — разделение излагаемого материала на главы и возможный краткий повтор некоторых изложенных ранее материалов. Распределение материала по главам выбрано с учётом опыта преподавания этого курса.

Некоторые из тем, иногда включаемых в раздел "Электричество" (сверхпроводимость, полупроводники, зонная теория твёрдого тела, явления на границе двух металлов), в данном курсе представлены в пятом томе "Магнетизм и электромагнитные явления".

В данном издании максимально возможно учтены рекомендации Международной организации по стандартизации, Международной электротехнической комиссии, Международного союза теоретической и прикладной физики, Международного союза теоретической и прикладной химии, Международной комиссии по освещению и XI Генеральной конференции по мерам и весам по вопросам терминологии, системы единиц СИ и обозначений. Кроме того, по возможности учтены рекомендации ГОСТ 9867-61 "Международная система единиц", ГОСТ 8.04-72 "Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений" и ГОСТ 16263-70 "Метрология. Термины и определения". Вместе с тем в отдельных случаях приводятся и устаревшие, но всё ещё широко применяемые на практике единицы, термины и обозначения.

В качестве иллюстраций использованы как оригинальные рисунки и фотографии авторов и издательства "БХВ-Петербург", так и изображения лицензионного типа *Royalty Free*, предназначенные для свободного использования (за исключением специально отмеченных).

В качестве задачника, в частности, можно рекомендовать:



Антошина Л. Г., Павлов С. В., Скипетрова Л. А. Общая физика: Сборник задач: Учебн. пособие / Под ред. проф. Б. А. Струкова. — М.: ИНФРА-М, 2006.

В качестве пособия по физическому практикуму, в частности, можно рекомендовать:



Бармасов А. В., Зароченцева Е. П., Коротков В. И. и др. Описания лабораторных работ Учебной лаборатории физического эксперимента физического факультета СПбГУ. Часть IV: Электричество. Постоянный электрический ток. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007.

В качестве справочника физических величин, в частности, можно рекомендовать:



Nordling C., Österman J. Physics Handbook for Science and Engineering. — 8th ed. — Lund: Studentlitteratur, 2006.

Основной курс общей физики для природопользователей состоит из следующих томов:

- ☐ механика¹;
- ☐ колебания и волны²;
- ☐ молекулярная физика и термодинамика³;
- ☐ электричество;
- ☐ магнетизм и электромагнитные явления;
- ☐ оптика и квантовая физика;
- ☐ атомная и ядерная физика.

Авторы признательны Анне Михайловне Бармасовой за целый ряд ценных советов и замечаний.

Авторы приносят искреннюю благодарность рецензентам пособия, а также главному редактору издательства "БХВ-Петербург" Екатерине Владимировне Кондуковой и зам. главного редактора Татьяне Николаевне Лапиной.

Авторы

¹ Бармасов А. В., Холмогоров В. Е. Курс общей физики для природопользователей. Механика / Под ред. А. С. Чирцова. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008.

² Бармасов А. В., Холмогоров В. Е. Курс общей физики для природопользователей. Колебания и волны / Под ред. А. П. Бобровского. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009.

³ Бармасов А. В., Холмогоров В. Е. Курс общей физики для природопользователей. Молекулярная физика и термодинамика / Под ред. А. П. Бобровского. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009.

Принятые термины и обозначения

В данном издании векторные величины обычно обозначаются жирным шрифтом, а скалярные — обычным (например, E — скалярная величина, а $\mathbf{E}$ — векторная величина).

Символ	Термин	Размерность
$ a $	Абсолютное значение (модуль) вектора $\mathbf{a}$	—
$\langle a \rangle$	Среднее значение величины a	—
$[\mathbf{a} \mathbf{b}]$	Векторное произведение векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ ($\mathbf{a} \times \mathbf{b}$)	—
$(\mathbf{a} \mathbf{b})$	Скалярное произведение векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ ($\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$)	—
a	Радиус внутренний	м
a	Ускорение	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
A	Атомная масса (атомный вес)	а.е.м., дальтон, кислородная единица
A	Работа (силы)	Дж
A	Эмиссионная постоянная	$\text{А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$
$A_{\text{внешн}}$	Работа внешних сил	Дж
b	Радиус внешний	м

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
B	Магнитная индукция	Тл
c	Скорость света	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
C	Ёмкость электрическая, электроёмкость	Ф
C	Произвольная постоянная	—
c_0	Скорость света в вакууме	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
C_0	Ёмкость конденсатора, когда между его обкладками находится вакуум	Ф
d	Расстояние между пластинами плоского конденсатора	м
d_{11}	Пьезоэлектрический модуль	$\text{Кл} \cdot \text{Н}^{-1}$
D	Вектор электрической индукции, электрическая индукция, вектор электрического смещения, электрическое смещение	$\text{Кл} \cdot \text{м}^{-2}$
D_n	Нормальная составляющая вектора электрической индукции D	$\text{Кл} \cdot \text{м}^{-2}$
D_τ	Тангенциальная составляющая вектора электрической индукции D	$\text{Кл} \cdot \text{м}^{-2}$
$D^{(\text{ir})}$	Нерационализованное смещение $4\pi D$	$\text{Фр} \cdot \text{см}^{-2}$
e	Число e — основание натуральных логарифмов ($e \approx 2,71828$)	—
e	Элементарный заряд	Кл
e	Единичный вектор	—
$\bar{e}$	Электрон	—
E	Вектор напряжённости электрического поля	$\text{Н} \cdot \text{Кл}^{-1}, \text{В} \cdot \text{м}^{-1}$
E	Энергия	Дж
E_C	Напряжённость электростатического поля в конденсаторе	$\text{Н} \cdot \text{Кл}^{-1}, \text{В} \cdot \text{м}^{-1}$

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
E_p	Напряжённость поля E вдоль оси диполя	$\text{Н}\cdot\text{Кл}^{-1}, \text{В}\cdot\text{м}^{-1}$
$E_{\perp}$	Напряжённость поля E в направлении, перпендикулярном к оси диполя	$\text{Н}\cdot\text{Кл}^{-1}, \text{В}\cdot\text{м}^{-1}$
E_{τ}	Тангенциальная составляющая вектора напряжённости электростатического поля	$\text{Н}\cdot\text{Кл}^{-1}, \text{В}\cdot\text{м}^{-1}$
E_c	Напряжённость коэрцитивного поля	$\text{Н}\cdot\text{Кл}^{-1}, \text{В}\cdot\text{м}^{-1}$
E_k	Кинетическая энергия	Дж
E_{ke}	Кинетическая энергия электрона	Дж
$E_{\text{п}}$	Потенциальная энергия	Дж
$E_{\text{пр}}$	Критическая напряжённость поля, напряжённость пробоя, электрическая прочность	$\text{В}\cdot\text{м}^{-1}$
$\exp(x)$	Экспонента e^x	—
f	Полуфокусное расстояние	м
F	Постоянная Фарадея (число Фарадея)	$\text{Кл}\cdot\text{моль}^{-1}$
F	Сила	Н
F_0	Сила взаимодействия между зарядами в отсутствие среды	Н
F_E	Сила электрического поля	Н
$F_{\text{Ст}}$	Сила Стокса	Н
G	Активная электрическая проводимость для постоянного тока	$\text{Ом}^{-1}, \text{См}$
G	Гравитационная постоянная, постоянная тяготения Ньютона	$\text{Н}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-2}$
h	Постоянная Планка	Дж·с

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
$\mathbf{H}$	Вектор напряжённости магнитного поля	$\text{А} \cdot \text{м}^{-1}$
I	Сила тока	А
I_a	Анодный ток	А
j	Плотность электрического тока	$\text{А} \cdot \text{м}^{-2}$
j_0	Плотность тока насыщения	$\text{А} \cdot \text{м}^{-2}$
k	Жёсткость пружины	$\text{Н} \cdot \text{м}^{-1}$
k	Коэффициент пропорциональности ($k \equiv \frac{1}{\varepsilon}$)	—
k	Постоянная Больцмана	$\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
k	Системный (переводной) коэффициент	—
K	Коэффициент установки	—
K	Электрохимический эквивалент [вещества]	$\text{г} \cdot \text{Кл}^{-1}$, $\text{мг} \cdot \text{Кл}^{-1}$
k_0	Коэффициент рационализации в системе СИ, равный $\frac{1}{4\pi}$	—
K_{Γ}	Баллистическая постоянная гальванометра по заряду, постоянная гальванометра	$\text{Кл} \cdot \text{м}^{-1}$
$\mathbf{l}$	Ось диполя	м
l	Расстояние, длина, контур	м
l_m	Баллистический отброс	м
L	Индуктивность	Гн
L	Длина	м
m	Масса	кг
M	Минерализация	$\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
M	Момент силы	Н·м
m_e	Масса [покоя] электрона	кг
n	Объёмная плотность (концентрация)	м ⁻³ , %
$\mathbf{n}$	Единичный вектор нормали	—
n_+	Концентрация частиц с положительным зарядом	м ⁻³
n_-	Концентрация частиц с отрицательным зарядом	м ⁻³
N	Количество	—
N_A	Число Авогадро	моль ⁻¹
N_D	Количество силовых линий вектора $\mathbf{D}$	—
N_E	Количество силовых линий вектора $\mathbf{E}$	—
N_+	Количество частиц с положительным зарядом	—
N_-	Количество частиц с отрицательным зарядом	—
p	Давление	Па
$\mathbf{p}$	Импульс	кг·м·с ⁻¹
$\mathbf{p}$	Электрический дипольный момент	Кл·м, Фр·см
P	Диэлектрическая поляризация (дипольный момент единицы объёма, поляризованность)	Кл·м ⁻²
P	Мощность электрического тока	Вт
$\mathbf{P}$	Вектор поляризации, поляризованность единицы объёма	Кл·м ⁻²
q	Заряд электрический [точечный]	Кл
Q	Заряд, количество электричества	Кл

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
Q	Теплота, количество теплоты	Дж
q_0	Пробный электрический заряд	Кл
r	Внутреннее сопротивление (источника ЭДС)	Ом
r	Радиус	м
r	Расстояние	м
$\mathbf{r}$	Радиус-вектор	м
R	Радиус	м
$\mathbf{R}$	Радиус-вектор	м
R	Электрическое сопротивление	Ом
R_3	Сопротивление заземления	Ом
R_K	Кажущееся сопротивление	Ом
R_H	Сопротивление нагрузки	Ом
S, S_I	Крутизна	$A \cdot B^{-1}$
S	Площадь	m^2
S_n	Площадь проекции на нормаль	m^2
t	Время	с
t	Температура	$^{\circ}C$
T	Период колебаний	с
T	Температура [абсолютная]	К
T_0	Период собственных колебаний	с
T_K	Температура (точка) Кюри для сегнетоэлектриков	К, $^{\circ}C$
T_C	Критическая температура (сверхпроводимости)	К

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
u	Скорость	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
U	Напряжение электрическое, разность потенциалов	В
U	Потенциал гравитационного поля	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$
U_i	Потенциал ионизации	В
U_a	Анодное напряжение	В
U_H	Абсолютный нормальный потенциал	В
U_C	Сеточное напряжение	В
v	Скорость	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
V	Объём	м^3
w	Объёмная энергия, плотность энергии	$\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3}$
w	Влажность	%
W	[Собственная] энергия	Дж
w_e	Объёмная плотность электрической энергии	$\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3}$
x	Абсолютное удлинение	м
Z	Валентность	—
Z	Зарядовое число атома (иона), число валентных электронов	—
α	Коэффициент объёмной ионизации	—
α	Поляризуемость	$\text{\AA}^3$
α	Температурный коэффициент сопротивления	К^{-1}
α	Угол	рад.
β	Коэффициент объёмной ионизации	

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
β	Коэффициент поляризуемости молекул неполярного диэлектрика	$\Phi \cdot \text{м}^2$
β	Коэффициент рекомбинации	
γ	Коэффициент ударной ионизации молекул газа	
Γ	Напряжённость гравитационного поля	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
$\Delta\varphi$	Разность потенциалов	В
ε	Диэлектрическая проницаемость [среды] (относительная диэлектрическая проницаемость)	—
ε_0	[Абсолютная] диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная)	$\Phi \cdot \text{м}^{-1}$
ε_a	Абсолютная диэлектрическая проницаемость [данной среды]	$\Phi \cdot \text{м}^{-1}$
E	Электродвижущая сила (ЭДС)	В
E_t	Электродвижущая сила (ЭДС) при температуре t	В
η	Поляризуемость среды	%
λ	Длина свободного пробега	м
λ, λ_q	Линейная плотность электрического заряда	$\text{Кл} \cdot \text{м}^{-1}$
λ_T	Коэффициент теплопроводности, теплопроводность	$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
λ_p	Коэффициент анизотропии	—
μ, μ_q	Подвижность носителей зарядов	$\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
μ	Магнитная проницаемость [среды] (относительная магнитная проницаемость)	—
μ	Дипольный момент молекулы	$\text{Кл} \cdot \text{м}$, $\text{Фр} \cdot \text{см}$

(продолжение)

Символ	Термин	Размерность
μ_0	Магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная)	$\text{Гн}\cdot\text{м}^{-1}$
μ_a	Абсолютная магнитная проницаемость	$\text{Гн}\cdot\text{м}^{-1}$
ν	Частота колебаний	Гц
ρ, ρ_q	Объёмная плотность электрического заряда	$\text{Кл}\cdot\text{м}^{-3}$
ρ	Плотность массовая	$\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$
ρ	Удельное электрическое сопротивление	$\text{Ом}\cdot\text{м}, \text{мКОм}\cdot\text{см}$
ρ_t	Удельное электрическое сопротивление при температуре t	$\text{Ом}\cdot\text{м}, \text{мКОм}\cdot\text{см}$
$\rho_{\perp}$	Удельное сопротивление поперёк напластования	$\text{Ом}\cdot\text{м}, \text{мКОм}\cdot\text{см}$
$\rho_{\parallel}$	Удельное сопротивление напластования	$\text{Ом}\cdot\text{м}, \text{мКОм}\cdot\text{см}$
ρ_+	Объёмная плотность положительного заряда	$\text{Кл}\cdot\text{м}^{-3}$
ρ_-	Объёмная плотность отрицательного заряда	$\text{Кл}\cdot\text{м}^{-3}$
π	Число пи ($\pi \approx 3,14159$)	—
σ	Механическое напряжение	$\text{Па}, \text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$
σ, σ_q	Поверхностная плотность электрического заряда	$\text{Кл}\cdot\text{м}^{-2}$
σ, σ_I	Удельная электропроводность (проводимость)	$\text{См}\cdot\text{м}^{-1}, \text{См}\cdot\text{см}^{-1}$
τ	Время релаксации	с
$\langle \tau \rangle$	Средняя продолжительность движения электрона между двумя столкновениями с ионами решётки	с
ϕ	Потенциал электрический, потенциал электрического поля в точке	В
Φ	Работа выхода	эВ, Дж

(окончание)

Символ	Термин	Размерность
Φ_B	Поток магнитной индукции, магнитный поток	Вб
Φ_D	Поток вектора электрической индукции (поток вектора электрического смещения, поток электрического смещения, поток индукции)	Кл
Φ_E	Поток вектора напряжённости E электростатического поля	В·м
χ	Магнитная восприимчивость	—
χ	Температурный коэффициент электролита	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
χ_e	Диэлектрическая восприимчивость	—
ω	Телесный угол	ср

ГЛАВА 1

Электростатика

Мы вступаем в мир чудес, более удивительных, чем те, о которых рассказывается в арабских сказках, более запутанных, чем Критский лабиринт, — мир громадный и фантастический.

К. Фламмарион¹

1.1. Электрические взаимодействия. Исторический очерк

Eripit Coelo fulmen scemprumgue tyrannis².

Изучая биографию Франклина, всё больше и больше понимаешь, почему существует всеобщее уважение и преклонение перед этим большим человеком, которого народ Америки дал человечеству.

П. Л. Капица³

Ломоносов был учёным в поэзии и искусстве и поэтом-художником в науке.

С. И. Вавилов⁴

¹ Камиль Фламмарион (Flammarion, 1842—1925 гг.) — французский астроном.

² Лат.: "Он отнял молнию у небес и власть у тиранов" — надпись, вырезанная на бюсте Франклина работы французского скульптора Жан-Антуана Гудона (Houdon, 1741—1828 гг.).

³ Пётр Леонидович Капица (1894—1984 гг.) — советский физик.

⁴ Сергей Иванович Вавилов (1891—1951 гг.) — советский физик.

Проявления атмосферного электричества (ионизация воздуха, электрическое поле атмосферы, электрические заряды облаков и осадков, электрические токи и разряды в атмосфере и т. д.), как и явление электризации трением, были давно известны человечеству. При этом связь между этими явлениями во все не была очевидна, а попытки объяснить их с точки зрения известных на тот момент физических взаимодействий были неудачными.

Ещё древнегреческий учёный Аристотель (Ἀριστοτέλης, 384—322 гг. до н. э.) заметил стремление молнии двигаться по металлическим предметам: *"Случалось, что медь щита расплавлялась, а дерево, его покрывающее, оставалось невредимым"*. Наставник римского императора Клавдия Цезаря Нерона (Nero, 37—68 гг.) философ Луций А. Сенека (Seneca, ок. 4 г. до н. э.—65 г.) писал: *"Серебро расплавляется, а кошелек, в котором оно заключалось, остаётся невредимым"*. Римский чиновник Плиний Старший (Plinius Secundus, 23 или 24—79 гг.) как-то заметил, что *"золото, медь, серебро, заключённые в мешке, могут быть расплавлены молнией, а мешок не сгорит и даже восковая печать не размягчится"*.

Ещё одно природное электрическое явление не оставалось незамеченным — *огни святого Эльма*¹. В разных странах их называли по-разному: "Корпо-Санто" в Португалии, "Кома-Санто" в Великобритании, "огни святого Николая" или "огни святой Клары" в Средиземноморье. Упоминания об этих явлениях можно найти в "Комментариях Кесаря", где Гай Юлий Цезарь (Caesar, 102 или 100—44 гг. до н. э.) писал, что *"в одну из ночей железные острия копий пятого легиона казались огненными"*. А вот что писал сын известного мореплавателя Христофора Колумба (Columbus/Colombo/Colon, 1451—1506 гг.): *"Моряки перестают бояться бури, когда показываются огни святого Эльма. В 1493 году, в октябре месяце... ночью, при сильной грозе и проливном дожде огни святого Эльма показались на мачте в виде семи зажжённых свеч. При виде этого чудесного явления весь экипаж стал молиться и петь благодарственные гимны"*. Спутник другого известного мореплавателя Фернана Магеллана (Magalhães, ок. 1480—1521 гг.) Геррера (Herrera) отмечал: *"Когда, во время бури, на мачте показывались огни святого Эльма, иногда в виде одной свечи, иногда в виде двух, матросы плакали от радости"*.

Начало научному подходу к изучению электричества было положено лейб-медиком английской королевы Елизаветы I (Elizabeth I, 1533—1603 гг.) — Уильямом Гильбертом (Gilbert, 1544—1603 гг.). Итогом его многолетних ис-

¹ Одна из форм *коронного разряда*. Своё название огни святого Эльма получили в Средние века по названию церкви святого Эльма, на башнях которой они часто возникали.

следований стал труд, опубликованный в 1600 г. в Лондоне под названием "О магните, магнитных телах и большом магните — Земле. Новая физиология, доказанная множеством аргументов и опытов". Он описал опыты с янтарём, отполированным трением или натиранием о шерстяную ткань, и констатировал, что не только янтарь, но и алмаз, сапфир, опал, аметист, берилл проявляли то же самое свойство — **электризацию**¹, т. е. способность притягивать лёгкие тела: сухую бумагу, опилки, сухие листья и т. п. При этом Гильберт не сумел установить факт отталкивания одинаково наэлектризованных тел.

Гильберт исследовал множество самых различных тел и даже построил для этой цели специальный электрический указатель, который он описывает таким образом: *"Сделай себе из любого металла стрелку длиной в три или четыре дюйма², достаточно подвижную на своей игле, наподобие магнитного указателя"*. С помощью этого прототипа современных электроскопов Гильберт установил, что способностью притягивать обладают многие тела, *"не только созданные природой, но и искусственно приготовленные"*. Однако он нашёл также, что многие тела *"не притягивают и не возбуждаются никакими натираниями"*. К числу их относится ряд драгоценных камней и металлы. Тела, обнаруживающие способность притяжения, Гильберт назвал электрическими, тела, не обладающие такой способностью, — неэлектрическими. Гильберт впервые употребил слова: "электрика", "электрический", "электричество". Так, по Гильберту *"электрические тела — те, которые притягивают таким же образом, как янтарь"*. В качестве примера электрических тел Гильберт называл гагат³ (разновидность каменного угля), серу, ирис (кристалл кварца), стекло, винцентину и бристольский алмаз (разновидности кварца), кристалл (кварц), мышьяк (минерал), аммонияк (камедь). Однако, описав множество интересных наблюдений, Гильберт не мог объяснить их.

Гильберт указал, как производится электризация тел трением: *"Их натирают телами, которые не портят их поверхности и наводят блеск, например жёстким шёлком, грубым немарким сукном и сухой ладонью. Трут также янтарь о янтарь, об алмаз, о стекло и многое другое. Так обрабатываются электрические тела"*.

Величайшей заслугой Гильберта было то, что ошибочно (как выяснится позднее) разделив электрические и магнитные явления, он фактически положил основание изучению этих явлений. Впрочем, в 1551 г. (т. е. за пятьдесят лет до Гильберта) итальянский философ, врач и математик Джероламо

¹ От греч. elektron — янтарь.

² 1 дюйм = 25,4 мм.

³ От греч. gagátēs — чёрный янтарь.

(Иеронимус) Кардано (Cardano, 1501—1576 гг.) уже указал на различие электрических и магнитных явлений.

Величайший итальянский учёный Галилео Галилей (Galilei, 1564—1642 гг.) высоко оценил Гильберта как экспериментатора и основателя учения об электричестве и магнетизме: *"Я воздаю величайшую хвалу, — писал Галилей, — и завидую этому автору, так как ему пришло на ум столь поразительное представление о вещи, бывшей в руках у бесконечного числа других людей возвышенного ума, но никем не подмеченной... И я не сомневаюсь, что с течением времени эта новая наука будет совершенствоваться путём новых наблюдений"*.

Следующим заметным этапом стали исследования шестидесятилетнего бургомистра немецкого города Магдебурга Отто фон Гэрике (Guericke, 1602—1686 гг.). Гэрике создал специальную **"электрическую машину"** — большой вращающийся шар, отлитый из серы (рис. 1). Натирая этот вращающийся шар руками или кожаными подушками, ему удалось получить на нём большие заряды. Гэрике провёл ряд экспериментов и первым установил, что заряженные тела могут не только притягиваться, но и отталкиваться. Гэрике установил, что электрическая сила способна распространяться по *"льняной нитке на один локоть"*¹. Он также отметил, что слышал при разряде шаров слабый треск и иногда наблюдал слабое свечение (*газовый разряд*).

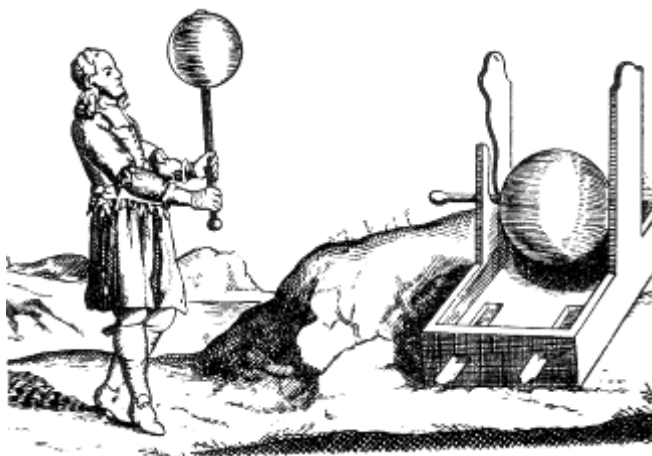


Рис. 1. Электрическая машина Гэрике (рисунок из сочинения Гэрике, 1672 г.) [31, 41]

¹ Примерно 455—475 мм.

Электрическими опытами занимался и английский учёный Исаак Ньютон (Newton, 1643—1727 гг.), который ещё в 1675 г. наблюдал электрическую "пляску" кусочков бумаги, помещённых под стеклом, положенным на металлическое кольцо. При натирании стекла бумажки притягивались к нему, затем отскакивали, вновь притягивались, и т. д.

Эксперименты по электричеству проводили и другие члены Лондонского королевского общества¹. Английский (ирландский) физик Роберт Бойль (Boyle, 1627—1691 гг.), повторив опыты Герики с шаром, установил, что наэлектризованное тело не только притягивает ненаэлектризованное, но и, в свою очередь, притягивается им. Он показал, что электрические взаимодействия наблюдаются не только в воздухе, но и в вакууме. Стефэн Грей (Grey, 1670—1736 гг.) в 1729 г. открыл явление электропроводимости тел и показал, что для сохранения электричества тело должно быть изолировано.

На опубликованные в 1731—1732 гг. опыты Грея обратил внимание французский физик Шарль Ф. Дюфё (Fau, 1698—1739 гг.), создавший первую теорию электрических явлений. Сначала Дюфе установил, что *"наэлектризованные тела притягивают ненаэлектризованные и сейчас же их отталкивают, как только они наэлектризуются вследствие соседства или соприкосновения с наэлектризованными телами"*. В дальнейшем он открыл *"другой принцип, более общий и более замечательный, чем предыдущие"*. *"Этот принцип, — отмечал Дюфе, — состоит в том, что существует электричество двух родов, в высокой степени отличных один от другого: один род я называю "стеклянным" электричеством, другой — "смоляным"...* "Стеклянным" он назвал электричество, возникавшее при натирании стекла и горного хрусталя. "Смоляное" появлялось при натирании смолы или янтаря. Особенность этих двух родов электричества состояла в том, что однородные электричества, например, натёртые стекло или хрусталь отталкивались, а разнородные, например, "стеклянное" и "смоляное" — притягивались.

Наблюдения Дюфе дают основания считать его автором качественного **закона взаимодействия электрических зарядов:**



Одноимённые заряды отталкиваются, разноимённые — притягиваются.

¹ Лондонское королевское общество по развитию знаний о природе (The Royal Society of London), ведущее научное общество Великобритании; создано в 1660 г. и утверждено Королевской хартией в 1662 г.

Этот закон был опубликован Дюфе в мемуарах Парижской академии наук за 1733 г.

В 1745 г. голландским физиком Питером ван Мушенбруком (Musschenbroeck, 1692—1761 гг.) в г. Лейдене была независимо от немецкого исследователя Э. Г. Клейста¹ (Kleist, 1700—1748 гг.) создана "лейденская банка" (стеклянная бутылка, заполненная наполовину металлическими опилками, вставленная в металлический цилиндрический сосуд) — т. е. устройство, способное накапливать и удерживать заряды (рис. 2).

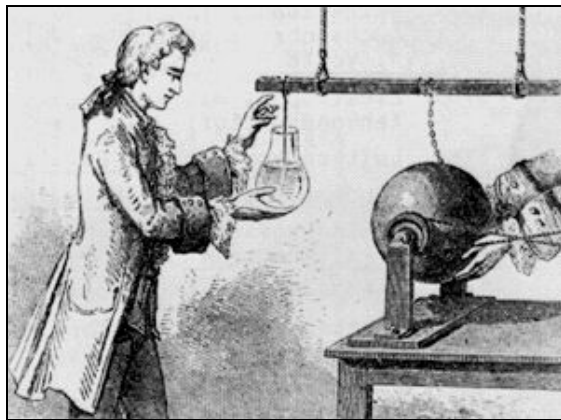


Рис. 2. Опыт Мушенбрука с лейденской банкой — электризация воды от электрической машины (стеклянный шар этой машины электризовался трением его о ладони рук) [41]

Уже Мушенбрук, описывая лейденскую банку, обратил внимание на физиологическое действие электрического разряда. Он писал: *"Хочу сообщить вам новый, но ужасный опыт, который не советую Вам повторить. Я занимался изучением электрической силы. Для этого я подвесил на шёлковых нитях железный стержень, получивший электричество от стеклянного шара, который быстро вращался вокруг оси и натирался руками. На другом конце висела медная проволока, конец которой был погружён в стеклянный круглый сосуд, заполненный наполовину водой, который я держал в правой руке; левой рукой я пытался извлекать из электрического стержня искру. Вдруг моя правая рука была поражена ударом с такой силой, что всё тело содрогнулось, как от удара молнии... Я думал, что всё кончено"* (рис. 3).

¹ Клейст в 1745 г. доложил Берлинской академии наук о своих опытах с "медицинской банкой".