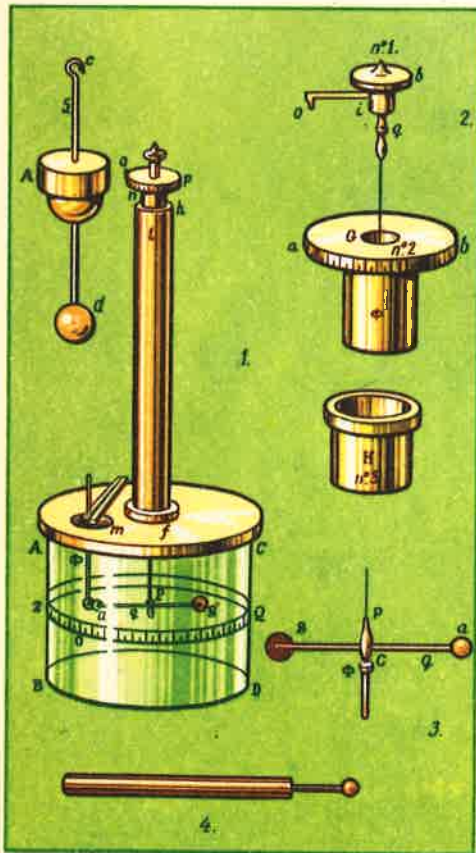


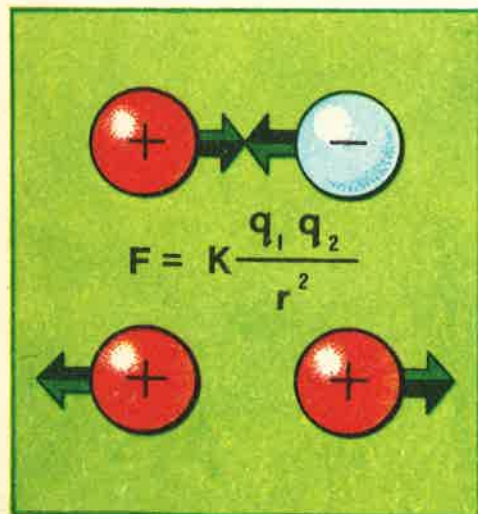
С. Р. ФИЛОНОВИЧ
ШАРЛЬ КУЛОН



Люди науки

В книге рассказывается о жизни и деятельности выдающегося французского ученого Шарля Огюстена Кулона (1736—1806).

Будучи по профессии военным инженером, Кулон считал, что научные исследования должны помогать практике. Не случайно первая научная работа Кулона была посвящена задачам строительной механики. Ориентируясь на инженерную практику, он начал изучать сухое трение и получил в этой области важные результаты. Конструируя прецизионные физические приборы, ученый столкнулся с явлением кручения тонких нитей, тщательно его изучил и установил закон, описывающий деформацию кручения. На основе этого закона Кулон сконструировал новый прибор — крутильные весы, при помощи которых можно было измерять очень малые силы. Именно применение крутильных весов позволило ученому установить основной закон электростатики, названный впоследствии его именем.



Люди
науки

С. Р. ФИЛОНОВИЧ

ШАРЛЬ КУЛОН

Книга для учащихся

8—10 классов
средней школы

МОСКВА
«ПРОСВЕЩЕНИЕ»
1988

Рецензенты: кандидат физико-математических наук *О. А. Лежнева*;
учитель физики *С. С. Савирская*

Филонович С. Р.

Ф55 Шарль Кулон: Кн. для учащихся 8—10 кл. сред. шк. —
М.: Просвещение, 1988. — 111 с.: ил. — (Люди науки).
ISBN 5-09-000273-8

Книга посвящена описанию жизни и деятельности выдающегося французского инженера и естествоиспытателя. Имя Шарля Кулона известно каждому школьнику: его носит основной закон электростатики. Кулону также принадлежат работы по механике и магнетизму, результаты которых вошли в золотой фонд науки. Ш. Кулон был современником Великой французской революции, и многие события той бурной эпохи нашли отражение в книге.

Ф $\frac{4306020000-709}{103(03)-88}$ 256—88

ББК 22.3г

ISBN 5-09-000273-8

© Издательство «Просвещение», 1988

В истории физики найдется немного имен, с которыми были бы знакомы все, без исключения, кто когда-либо изучал физику в школе или вузе. К их числу относится имя выдающегося французского физика и инженера Шарля Огюстена Кулона, внесшего значительный вклад в развитие строительной механики, учения о трении, в исследование электрических и магнитных явлений. Кулон оказал также большое влияние на разработку методов проведения точных физических экспериментов.

Многогранная деятельность и научные работы Кулона представляют значительный интерес не только для специалистов по истории науки, но и для широкого круга читателей. Получив профессию военного инженера, он на протяжении тридцати лет занимался самыми разнообразными инженерными вопросами — от строительства военных укреплений до эксплуатации и усовершенствования систем водоснабжения. При этом почти в любой инженерной проблеме он видел проблему научную: вся его деятельность является прекрасной иллюстрацией того, что практика есть источник развития науки.

Кулон жил в бурную эпоху истории Франции — эпоху Великой французской буржуазной революции. Многие исторические события этого периода нашли отражение в его судьбе. Не будучи сам революционером по натуре и убеждениям, Кулон тем не менее относился к той части учёных Франции, которые видели пороки прогнившего феодально-абсолютистского строя и по мере сил стремились противостоять им. В жизни Кулона имеется немало примеров проявления гражданского мужества и профессиональной честности.

Но главное, конечно, — это блестящие научные результаты, полученные Кулоном. Закономерности внешнего трения, закон кручения упругих нитей, основной закон электростатики, закон взаимодействия магнитных полюсов — все это вошло в золотой фонд науки. «Кулоновское поле», «кулоновский потенциал», наконец, название единицы электрического заряда «кулон» прочно закрепились в физической терминологии.

Известно, что знакомство с произведениями классиков науки позволяет в полной мере ощутить глубину и оригинальность их мышления, понять, до какой степени подход к физическим проблемам и методы их решения, характерные для ученых прошлого, близки современной науке. Поэтому автор стремился там, где это было оправдано, пользоваться цитатами из работ Кулона, а не пересказывать их содержание своими словами. Этим объясняется довольно частое использование оригинальных текстов, характерное для этой книги.

При работе над предложенной читателю биографией Кулона использовалось большое число источников. Основные данные о жизни Кулона взяты из биографического очерка, написанного известным французским физиком Ж.-Б. Био, лично знавшим Кулона, и книги С. Гилмора «Кулон и эволюция физики и инженерии во Франции XVIII в.» (Princeton, 1971).

Научное творчество Кулона освещается на основе анализа его опубликованных мемуаров, а также книг и статей советских и зарубежных ученых по гражданской истории и истории науки.

ВВЕДЕНИЕ

История Франции второй половины XVIII в. представляет собой, по-видимому, один из наиболее изученных разделов всемирной истории. К этому периоду относятся и десятилетия, непосредственно предшествовавшие Французской буржуазной революции, и годы одного из наиболее интересных революционных переворотов в истории Европы, и последовавшие за ними годы Директории и консульства. Это время ознаменовано важнейшими событиями в духовной жизни Франции, такими, как издание знаменитой тридцатипятитомной «Энциклопедии, или Толкового словаря искусств, наук и ремесел» (1751—1780) и публикация «Философского словаря» Вольтера (1764—1769) и его философских повестей, сыгравших огромную роль в идейной подготовке революции и развитии мировой общественно-философской мысли.

Вторая половина XVIII в. весьма интересна и с точки зрения развития экономики. Феодальная система хозяйствования, одной из наиболее ярких представителей которой была Франция, терпела крах. Развивающаяся капиталистическая система, представленная Англией, набирала силы. В 60-е гг. XVIII в. в Англии начался так называемый промышленный переворот, суть которого составлял переход от мануфактурного к машинному производству. В условиях интенсивного развития производительных сил и освоения колоний постепенно прогрессирует инженерное искусство.

Рассматриваемый период занимает важное место в истории науки. Он отмечен крупными достижениями в различных областях естествознания, к которым можно отнести разработку методов аналитической механики, усовершенствование астрономических инструментов, приведшее к открытию новых небесных объектов, внедрение в химию количественных методов и создание рациональной номенклатуры химических соединений и т. д. Особую роль сыграл этот период в истории физики. На протяжении всего XVIII в. шел процесс формирования физики как самостоятельной научной дисциплины, ее выделения из обширной и несколько неопределенной области натуральной философии. Ускорению этого процесса в значительной степени способствовали успехи в изучении тепловых, магнитных и электрических явлений. Если в XVII в. они рассматривались от случая к случаю, то в XVIII столетии можно проследить непрерывную цепь исследований в области теплоты, электричества и магнетизма. Ко второй половине XVIII в. открытия в этих областях были уже обобщены в рамках элементарных, сугубо качественных теорий.

Вторая половина XVIII в. отмечена и некоторыми изме-

нениями в социальном положении науки. Особенно отчетливо это заметно на примере деятельности Парижской академии наук, основанной в 1666 г. по распоряжению Людовика XIV. В 1699 г. был утвержден новый устав академии, основные положения которого действовали на протяжении почти всего XVIII столетия, вплоть до начала Великой французской буржуазной революции. Этот устав определял круг обязанностей и порядок работы академии как государственного учреждения. Члены академии участвовали в рассмотрении множества конкретных проектов, касавшихся самых разнообразных проблем инженерного и военного искусства, финансов, здравоохранения и т. д. Традиции привлечения ученых к решению задач государственной важности проявились в годы революции, когда такие выдающиеся ученые, как математик, создатель начертательной геометрии Г. Монж, химик, основатель учения о химическом равновесии К. Бертолле и другие члены академии внесли значительный вклад в дело обороны революционной Франции от нашествия внешних реакционных сил.

Все перечисленные особенности истории Франции и развития науки второй половины XVIII в. достаточно хорошо изучены, каждой из них посвящено немало научных и популярных книг и статей. Однако хотелось бы представить все эти законы и тенденции в единой связи, во взаимодействии. Одним из самых эффективных способов комплексного изучения проблем истории является исследование жизни и деятельности представителей определенной исторической эпохи. Именно в судьбах людей закономерности той или иной эпохи отражаются во взаимодействии, демонстрируя сложность и глубину реального исторического процесса.

Герой этой книги — выдающийся французский инженер, ученый Шарль Огюстен Кулон (1736—1806). Его жизнь соответствует тому периоду мировой истории, истории науки, о котором говорилось выше. На наш взгляд, судьба Кулона, и как человека, и как ученого, исключительно рельефно иллюстрирует специфику той эпохи, в которую он жил.

Перед Кулоном, как и перед другими выходцами из слоев средней и мелкой буржуазии, остро стояла проблема выбора жизненного пути. Большой удачей лично для Кулона и для инженерного искусства в целом стало избрание им в качестве будущей профессии военной инженерии. На этом поприще Кулон сумел проявить себя как талантливый организатор и инженер-практик. Здесь же впервые выявилась его склонность к исследовательской деятельности. Особенности биографии Кулона в данном случае могут без сомнения рассматриваться как проявление зарождавшейся в середине XVIII в. тенденции к переводу инженерного дела на научные рельсы.

Карьера Кулона отражает важнейшие события истории Франции второй половины XVIII столетия. Его служба в

заморской колонии обусловлена авантюристической внешней политикой французского двора, приведшей к серьезным поражениям Франции на международной арене. Характер проектов, в реализации которых участвовал Кулон после возвращения на родину, показывает, что правящие круги страны руководствовались главным образом не государственными интересами, а жадной наживы и личными амбициями военной и финансовой верхушки. Обстоятельства, связанные с работой Кулона в рамках этих проектов, свидетельствуют о его личной честности и принципиальности в профессиональных вопросах.

Деятельность Кулона в Парижской академии наук, а затем в Национальном институте наук и искусств типична для члена этих научных учреждений. Одновременно с проведением собственных научных исследований, результаты которых вошли впоследствии в золотой фонд науки, Кулон участвовал в работе многочисленных академических комиссий, выступал с докладами о работах и изобретениях других ученых и т. д. Ряд заданий, полученных Кулоном от академии, имели большую общественную (и даже социальную) значимость.

Однако работа Кулона как военного инженера или одного из членов высшего научного учреждения Франции может рассматриваться как интересный, но все же второстепенный пример из истории второй половины XVIII в., а вот его исследование по физике, и прежде всего мемуары, посвященные внешнему трению, кручению тонких нитей и электро- и магнитостатике, являются неотъемлемой частью истории физики. Важнейшей особенностью творчества Кулона было стремление к проведению количественных экспериментов в различных, в том числе только формирующихся, областях науки.

В каждое из перечисленных выше направлений Кулон внес значительный вклад как в смысле получения конкретных результатов, так и с точки зрения развития методов научного эксперимента. Так, при исследовании внешнего трения им была показана ограниченность основного закона трения, утверждающего пропорциональность силы трения и силы нормального давления, изучено явление застоя, создана механическая картина трения волокнистых и «твердых» тел. Следует особо отметить, что эксперименты с трением Кулон проводил в масштабах, характерных не для небольших лабораторий, а для реальных условий инженерной практики. Кулон специально подчеркивал значение этих полномасштабных физических экспериментов для внедрения результатов научных исследований в практику. Именно реализация этого принципа обеспечила долгую жизнь конкретных результатов Кулона, которые использовались в инженерной практике до конца XIX в.

Исследование явления кручения тонких нитей, к которому обратился Кулон в связи с практически важной задачей создания чувствительного детектора изменений магнитного по-

ля Земли, привело ученого к разработке метода измерения малых сил, который до сих пор применяется в научных исследованиях. В современной физике нередки случаи, когда создание какого-то частного метода измерений приводит к прогрессу в исследовании целого круга задач, относящихся к отдаленным друг от друга областям. В истории науки создание крутильных весов представляет один из первых примеров такого рода.

Научная интуиция, которой обладал Кулон, способствовала тому, что он применил разработанную им методику измерения малых сил для решения одной из важнейших задач молодой тогда науки об электричестве — для установления (1785 г.) основного закона электростатики, теперь по праву носящего имя Кулона. Точность, с которой Кулон подтвердил закон «обратных квадратов», как иногда называют закон взаимодействия неподвижных точечных зарядов, невелика, она ниже точности, с которой эта закономерность была получена (посредством другой методики) английским естествоиспытателем Г. Кавендишем (1731—1810) задолго до Кулона (в 1773 г.). Однако проведенные Кулоном опыты имели и иное значение, чем проверка зависимости силы электростатического взаимодействия от расстояния. Они давали возможность абсолютных измерений этой силы и тем самым позволили установить связь между фундаментальным понятием заряда, на котором основано все учение об электричестве, и привычными механическими величинами: расстоянием и силой. Эта связь оказалась мостиком, соединившим два раздела физики: хорошо развитую механику с учением об электричестве, основные понятия которого только формировались.

Но значение цикла электростатических исследований Кулона не ограничивается открытием закона, носящего его имя. Изучая распределение зарядов по поверхности проводящих тел сложной формы, Кулон получил результаты, которые уже после его смерти (в 1811 г.) были использованы выдающимся французским физиком и математиком С. Д. Пуассоном для проверки справедливости построенной им теории потенциала — первой полной теории, количественно описывающей явления электростатики.

Таким образом, Кулон внес огромный вклад в развитие различных областей физики. Один из младших современников Кулона, английский врач и физик Томас Юнг, открывший закон интерференции света, в биографическом очерке о Кулоне, написанном для Британской энциклопедии, так определил место Кулона в науке конца XVIII — первого десятилетия XIX в.: «Коротко говоря, среди всех людей науки, принесших славу Франции, трудно было бы указать одного человека, кто с точки зрения развития земной физики мог бы хоть как-то сравниться с м-ром Кулоном». Высокая оценка заслуг Кулона характерна и для современных историков науки.

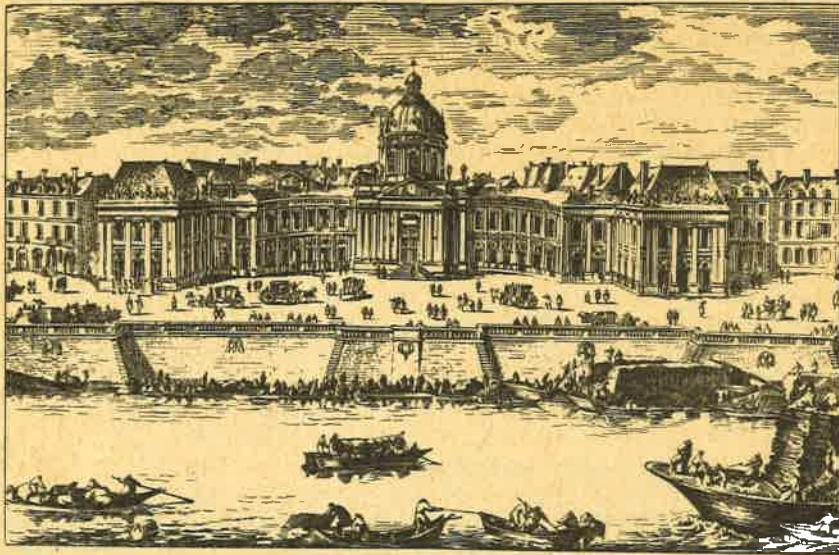
Глава I.

ДЕТСТВО И ЮНОСТЬ

Шарль Огюстен Кулон родился 14 июня 1736 г. в г. Ангулеме, который находится на юго-западе Франции. Его отец, Анри Кулон, в свое время пытавшийся сделать военную карьеру, к моменту рождения сына стал правительственным чиновником. Ангулем не был постоянным местом жительства семьи Кулонов; через некоторое время после рождения Шарля она переехала в Париж.

В Париже Анри Кулон был привлечен к сбору налогов — делу, составлявшему одну из основных забот короля. Средства, которыми располагала семья, позволили юному Кулону получить хорошее начальное образование. Отец мальчика, занятый повседневными заботами королевского чиновника, человек, по отзывам знавших его людей, мягкий и уступчивый, предоставил право решать будущее сына своей супруге. Мать Шарля, урожденная Катрин Баже, происходившая из знатного рода де Сенак, хотела, чтобы ее сын стал врачом. Исходя из этого замысла, она выбрала учебное заведение, которое поначалу посещал Шарль Огюстен — Коллеж четырех наций, известный также как Коллеж Мазарини.

Это учебное заведение, открытое в 1688 г. по завещанию известного политического деятеля, канцлера Франции, кардинала Мазарини, представляло собой одну из лучших школ того времени, где обучали молодых людей дворянского происхождения риторике, математике, логике, классическим языкам и началам физики. Об элитарном характере Коллежа Мазарини можно судить хотя бы по тому, что в нем одновременно обучалось всего около тридцати мальчиков в возрасте от десяти до пятнадцати лет. Одной из особенностей Коллежа был высокий уровень преподавания математики: в нем учились ставшие впоследствии известными учеными Делиль,



Коллеж четырех наций (Коллеж Мазарини), где учился Кулон. Впоследствии в этом здании располагался Институт Франции.

Даламбер, Лавуазье. Возможно, что благодаря хорошо поставленному преподаванию математики Кулон рано заинтересовался этим предметом. Во всяком случае, одновременно с учебой в Коллеже Мазарини он посещал лекции известного математика Лемоннье, читавшиеся в Коллеже Рояль де Франс. Точное время учебы Кулона в Париже неизвестно, однако можно предположить, что этот период относится к 1746—1751 гг.

Дальнейшую судьбу Кулона определили события, которые произошли в жизни его семьи. Анри Кулон, не обладавший, видимо, серьезными способностями в финансовой области, разорился, пустившись в спекуляции, вследствие чего был вынужден уехать из Парижа на родину, в Монпелье, на юг Франции. Там проживало много влиятельных родственников, которые могли помочь неудачливому финансисту. Его супруга не пожелала последовать за мужем и осталась в Париже вместе с Шарлем и его младшими сестрами. Однако юный Кулон недолго прожил с матерью. Его интерес к математике настолько возрос, что он объявил о решении стать ученым. Конфликт между матерью и сыном привел к тому, что Шарль покинул столицу и переехал к отцу в Монпелье.

Мужчины из семьи Кулонов традиционно занимались юриспруденцией. Самым видным представителем семейства, оказавшим поддержку Анри, был его двоюродный брат Луи,

адвокат, субделегат парламента от области Нижний Лангедок, член финансовой палаты Монпелье. Луи Кулон, занимавший видное положение в Монпелье, знал многих членов Королевского научного общества Монпелье, которым представил своего племянника, проявлявшего интерес к математике. Именно с этим обществом связаны важнейшие события, произошедшие в жизни юного Кулона во время его относительно краткого пребывания в Лангедоке.

Королевское научное общество Монпелье было одним из ряда провинциальных научных объединений, образовавшихся во Франции в XVIII в. Хотя конкретные научные результаты, полученные членами провинциальных обществ, не были очень значительными, эти объединения играли важную роль в распространении естественнонаучных знаний. Ряд видных ученых Франции, чьи основные успехи связаны с Парижской академией наук, начинали свою деятельность в провинциальных обществах.

Научное общество Монпелье, основанное в 1706 г., было вторым после столичной академии объединением, статус которого был утвержден королем. Оно имело четко определенную структуру, отчасти копирующую структуру Парижской академии наук. Общество состояло из пяти классов: математического, анатомического, химического, ботанического и физического. В каждом классе было по три постоянных члена, кроме которых в общество могло входить до пятнадцати младших членов — адъюнктов, а также шесть почетных и четыре иностранных члена. Общество собиралось на еженедельные заседания, где обсуждались разнообразные научные проблемы. Вскоре после переезда в Монпелье в этих собраниях стал принимать участие и Кулон.

В феврале 1757 г. на заседании Королевского научного общества молодой любитель математики прочел свою первую научную работу «Геометрический очерк среднепропорциональных кривых». К этому моменту Кулону уже исполнился 21 год, и по возрасту он мог быть избран адъюнктом. Поскольку работа заслужила одобрение членов общества, то вскоре начинающий исследователь был избран адъюнктом по классу математики. В дальнейшем Кулон принимал активное участие в работе общества и представил еще пять мемуаров — два по математике и три по астрономии. Его интерес к астрономии был вызван наблюдениями, которые он проводил вместе с другим членом Общества Монпелье — де Раттом. Кулон участвовал в наблюдениях кометы и лунного затмения, результаты которых он и представил в виде мемуаров. Интересовали Кулона и теоретические вопросы астрономии: одна из его работ была посвящена определению линии меридиана.

Успехи молодого Кулона на научном поприще позволяли надеяться, что со временем он займет достаточно высокое

положение в Научном обществе Монпелье. Однако участие в деятельности общества могло принести лишь моральное удовлетворение и не решало основной проблемы, стоявшей перед Кулоном: не обеспечивало постоянного и надежного источника средств существования.

Перед молодым человеком из буржуазной семьи во Франции XVIII в. открывалось несколько путей. Во-первых, он мог принять духовный сан в расчете на получение церковной синекуры. Во-вторых, имелась возможность стать гражданским чиновником. В-третьих, он мог избрать военную карьеру. Любовь Кулона к научным занятиям, вероятно, делала для него невозможным выбор первого из путей. Печальный опыт отца, по-видимому, отвращал его и от карьеры чиновника или финансиста. Посоветовавшись с отцом, Шарль выбрал карьеру военного инженера.

Служба в инженерном корпусе французской армии не сулила быстрого продвижения по службе. Такого продвижения можно было бы добиваться, став офицером другого рода войск. Однако для этого требовалось достаточно высокое происхождение и... значительные средства — ведь в королевской Франции офицерское звание (патент) можно было купить. Продажа званий и должностей составляла одну из существенных статей дохода королевской казны. Ни тем, ни другим Кулон не обладал. Но дело, видимо, даже не в этом. Инженерная деятельность в условиях того времени в наибольшей степени отвечала интеллектуальным запросам молодого Кулона. Кроме того, выбор профессии военного инженера давал возможность получить прекрасное образование в Военно-инженерной школе в Мезьере — высшем техническом учебном заведении, считавшемся в середине XVIII в. одним из лучших в Европе.

Итак, Кулон сделал выбор, определивший его судьбу на многие годы. Летом 1758 г. он взял отпуск в Научном обществе Монпелье и, получив рекомендательные письма к нескольким членам Парижской академии наук, необходимые в те времена для начала карьеры, отправился в столицу. Именно в Париж, а не на север Франции, в Мезьер, приезжали молодые люди, мечтавшие стать военными инженерами, чтобы сдать вступительные экзамены в Военно-инженерную школу.

Поступавшие в Мезьерскую школу сдавали экзамен по математике, который принимал несколько раз в год аббат Камю, преподаватель школы, приезжавший для этого в Париж. Экзамен, по-видимому, был достаточно трудным, поскольку, чтобы его сдать, Кулону потребовалось в течение девяти месяцев заниматься с преподавателем. И это после того, как он уже подготовил несколько самостоятельных работ по математике! Наконец, экзамен был сдан и в феврале 1760 г. Кулон направился в Мезьер.

Военно-инженерное искусство имеет многовековую историю.

Его корни уходят в эпоху античности: греческие и римские инженеры умели возводить довольно сложные оборонительные сооружения и конструировали специальные штурмовые машины¹. В средние века военная архитектура получила дальнейшее развитие: все замки и города строились с учетом их возможного использования в военных целях. Формирование крупных государств и усиление в них централизованной власти привели к увеличению масштабов военных действий и к повышению роли инженерных мероприятий в ведении войны. Во Франции признание этой роли было ознаменовано созданием в 1675 г. специального Военно-инженерного корпуса. Идея создания этого подразделения французской армии принадлежит одному из наиболее талантливых инженеров второй половины XVII — начала XVIII в. С. де Вобану (1633—1707), строителю более тридцати крупных крепостей и фортов, получившему в 1703 г. за заслуги перед королем и государством звание маршала Франции. Вобан был не только инженером-практиком, он написал несколько теоретических работ по фортификации (авторство которых, правда, впоследствии оспаривалось) и хорошо понимал значение математики в подготовке инженеров. Именно по его инициативе для офицеров Военно-инженерного корпуса был введен экзамен по математике. Однако почти до середины XVIII в. корпус не имел четкой структуры и, главное, отсутствовала какая-либо систематическая подготовка военно-инженерных кадров. От офицеров корпуса требовалось знание геометрии, основ элементарной математики, умение рисовать и чертить. Профессиональные знания они получали не из учебников, а из таких книг, как «Трактат по стереотомии»² А. Ф. Фрезье, «Инженерная наука» и «Гидравлическая архитектура» Б. Белидора.

Лишь в 1744 г. Военно-инженерному корпусу была придана четкая структура и определена численность офицерского состава — 300 человек. Спустя еще пять лет, в 1749 г., была основана Школа в Мезьере, которая должна была обеспечить кадрами реформированный корпус.

К моменту поступления в Мезьерскую школу (февраль 1760 г.) Кулону было двадцать три года. Однако учеба в столь «солидном» возрасте не была для Школы военных инженеров чем-то удивительным. В нее принимались слушатели трех категорий. К первой относились юноши в возрасте 17—18 лет, не служившие ранее в армии. Ко второй категории слушателей относились молодые люди, уже прослужившие несколько лет в инженерных войсках французской армии. Третью группу обра-

¹ Одним из выдающихся конструкторов античности был Архимед. О созданных им военных машинах можно прочитать в книге: Житомирский и С. В. Архимед. — М.: Просвещение, 1981.

² Стереотомия — наука об обработке твердых материалов, используемых в строительстве и промышленности.

зовывали люди более старшего возраста, которых можно условно назвать ветеранами Военно-инженерного корпуса. Таким образом, Кулон оказался слушателем «среднего» возраста.

При приеме в Мезьерскую школу во времена Кулона предпочтение отдавалось представителям дворянского сословия, хотя не запрещался прием слушателей, происходивших из буржуазии. В школу охотно принимались и молодые люди, в чьей родословной числилось несколько поколений военных. Именно к этой группе относился Кулон — его отец и один из родственников по отцовской линии некоторое время служили в армии¹.

Мезьерская школа занимала довольно просторный старинный дворец. Условия жизни слушателей были вполне комфортабельными: каждому предоставлялась отдельная комната. Одновременно в школе обучалось около 30 человек. После зачисления в школу молодым людям присваивалось младшее офицерское звание и назначалось денежное содержание в размере 600 ливров в год. Это были небольшие средства, и многие слушатели, кроме того, получали материальную помощь из дома.

К тому времени, когда Кулон поступил в школу, в ней уже выработалась определенная система подготовки инженеров. Занятия строились таким образом. Три дня в неделю были посвящены «теоретическим» дисциплинам: утром проходили трехчасовые занятия по архитектуре, черчению, картографии, вечером три часа посвящались математике. В остальные три учебных дня слушатели занимались практической геодезической съемкой, составлением карт на местности и т. д. Будущих военных инженеров учили также плотницкому искусству, методам обработки камня и т. д. В качестве практики слушатели школы строили арки, мосты и другие сооружения в окрестностях Мезьера. Кроме того, для приобретения опыта организации строительства им поручалось руководство бригадами местных крестьян, мобилизованных на общественные работы. При выполнении заданий такого рода слушатели учились вести документацию и выполнять расчеты, связанные с определением затрат на строительство. Таким образом, обучение в Мезьерской школе имело очевидную практическую направленность.

Однако работа в качестве каменотеса или плотника, конечно, не могла дать той подготовки, которая была необходима для научных исследований, выполненных Кулоном впоследствии. Какие же знания в области теории давала своим слушателям школа в Мезьере?

¹ В ряде очерков о Кулоне к его фамилии добавляется приставка «де», свидетельствующая о дворянском происхождении. Однако никаких документальных доказательств права Кулона на дворянское звание нет, поэтому его правильнее считать выходцем из буржуазной среды.

Математика изучалась по четырехтомному учебнику, написанному уже упоминавшимся экзаменатором школы аббатом Камю. Это было весьма элементарное пособие, в котором излагались основы арифметики, геометрии и элементы теории логарифмов. Третий и четвертый тома были посвящены механике, точнее, одному из ее разделов — статике. В них рассматривались приемы сложения сил, нахождения центра тяжести, эмпирические методы определения формы арочных перекрытий, черчение зубчатых колес и т. д. В целом изучение статике ограничивалось определением условий равновесия простых механизмов. Поскольку военные инженеры должны были владеть знаниями в области гидравлики, Камю включил в свой учебник соответствующий раздел, поместив в него отрывки из работ Э. Мариотта и Л. Вариньона. В целом, несмотря на определенные достоинства, пособие Камю не отвечало требованиям времени: в нем отсутствовали какие-либо упоминания о методах дифференциального и интегрального исчисления и их применениях к инженерным проблемам.

Кулона, имевшего повышенный интерес к математике, вряд ли удовлетворяло преподавание аббата Камю. На его счастье, в школе работал и другой преподаватель математики — аббат Шарль Боссю (1730—1814), ставший впоследствии известным ученым, членом Парижской академии наук. Хотя в обязанности Боссю входило обучение слушателей математике в пределах, очерченных курсом Камю, он постепенно вводил в практику преподавание элементов исчисления бесконечно малых, аксонометрии, динамики и гидродинамики. Сблизившись с Боссю во время учебы в Мезьере на почве интереса к математике, Кулон в течение многих лет поддерживал с ним дружеские отношения.

Еще одним важным источником знаний, пригодившихся в дальнейшем Кулону в научной работе, были лекции по экспериментальной физике, которые летом 1760 г. начал читать в Мезьерской школе известный французский естествоиспытатель аббат Нолле (1700—1770). Об этом человеке следует сказать особо.

Нолле происходил из полуграмотной крестьянской семьи, однако настойчивость в достижении цели и стремление к знаниям помогли ему добиться в жизни больших успехов. Он стал членом Парижской академии наук, носил звание наставника королевской семьи, его приглашали в качестве эксперта по вопросам, связанным с физикой, в другие страны. Большой популярностью пользовались лекции по экспериментальной физике, которые Нолле регулярно читал в Париже и других городах Франции. Они привлекали слушателей обилием опытов, которые Нолле ставил при помощи им же разработанных приборов. В середине XVIII в. он был, бесспорно, одним из ведущих экспериментаторов Европы. Особое внимание

ученый уделял проблемам электричества, и хотя его воззрения на природу электричества были ошибочными, дискуссии, которые он вел по этому поводу со знаменитым американским естествоиспытателем Б. Франклином, в целом способствовали прогрессу электрических исследований.

Однако успехи в изучении теоретических предметов еще не гарантировали соответствующей аттестации при выпуске. Как уже говорилось, руководство школы больше ценило достижения слушателей на практическом поприще. Поэтому основатель и глава Мезьерской школы Никола де Шатильон дал Кулону такую характеристику:

«Месье Кулон из Академии (т. е. Научного общества.— С. Ф.) Монпелье. Хорошего поведения, он понимает чертежи и выполняет их довольно неплохо. Его работа об осаде хуже средней, рисунки сделаны очень плохо, с подчистками и пометками. Они выполнены небрежно, с использованием неправильных обозначений. Он полагает, так же как и многие другие со сходным образом мыслей, что древесину для лафетов и повозок можно просто найти в лесу; это свидетельствует о весьма слабом представлении о строительстве. У него есть определенные умственные способности, но не те, которые будут способствовать успехам в Корпусе [военных инженеров]. Его проект арки для крытой аллеи выполнен со старанием и пониманием, за исключением некоторых ошибок в окраске ската сечения и недостаточной ширины парапета; масштаб выдержан не совсем точно...»

Эти слова были написаны в 1761 г. в связи с успешной сдачей Кулоном и семью другими слушателями выпускных экзаменов и рекомендацией их аббатом Камю к выпуску. По окончании Школы военных инженеров Кулон, как и другие, получил чин лейтенанта и вместе с еще двумя выпускниками был отмечен денежной премией в размере 150 ливров. Это означает, что, несмотря на довольно суровую оценку, данную Кулону Шатильоном, он по учебе был среди лучших.

В ноябре 1761 г. Кулон окончил Школу и получил отпуск, после которого должен был явиться к месту своего первого назначения — в крупный порт на западном побережье Франции — Брест.

Глава

II.

СЛУЖБА НА МАРТИНИКЕ

По прибытии в Брест Кулону было поручено выполнение второстепенных картографических работ, проводившихся в связи со строительством укреплений на побережье. Обычно молодой

офицер должен был прослужить на месте первого назначения два года, а затем получить новое. Однако в случае с Кулоном судьба распорядилась иначе. Еще до окончания первых двух лет службы было принято решение о переводе Кулона в заморские владения Франции — на остров Мартинику.

Внешняя политика Франции во времена правления Людовика XV (1723—1774) отличалась исключительной непоследовательностью. Король вел непрерывные войны, не приносящие стране ни славы, ни практической выгоды и поэтому очень непопулярные у народа. Военные действия велись как в Европе, так и за ее пределами: на протяжении десятилетий Франция и Англия боролись за колониальное господство. Одним из эпизодов этого спора стали столкновения французов и англичан в Индии, Африке и Америке в период так называемой Семилетней войны (1756—1763 гг.). Хотя сначала Франция одержала несколько побед на море, в целом Семилетняя война обернулась для нее катастрофой: французская армия была разбита в сражениях на европейском театре военных действий, Франция потеряла часть колониальных владений в Канаде, кроме того, было подорвано положение французских колоний на полуострове Индостан. В 1759 г. военные действия начались вокруг Антильских (Вест-Индских) островов. Англичане захватили острова Мартинику и Гваделупу и разрушили Форт-Рояль — административный центр Мартиники. Отвоевать острова французы не смогли, поскольку их флот был практически разгромлен. В 1763 г. в результате мирных переговоров, на которые вынуждена была пойти Франция, в Париже был подписан унизительный для нее мирный договор. Согласно этому договору Франция теряла многие колониальные владения: колонии в Индии, всю Канаду и др. Однако заинтересованные в работоторговле и импорте товаров из Вест-Индии негодяны крупных портовых городов Бордо, Гавра и Нанта настояли на том, чтобы Франции были возвращены Антильские острова.

После заключения Парижского мирного договора и возвращения Мартиники французам военный министр Людовика XV Шуазель решил построить на острове укрепления, которые в будущем защитили бы его от нападения англичан. Был объявлен конкурс на лучший проект форта для Мартиники, который выиграл лейтенант-полковник (т. е. подполковник) де Рошмор, опытный инженер с более чем тридцатилетним стажем. Он был назначен руководителем фортификационных работ на Наветренных островах¹ и в апреле 1763 г. отправился туда во главе группы из десяти инженеров.

Рошмор приступил к подготовительным работам на Марти-

¹ Наветренные острова — восточная часть архипелага Малые Антильские острова.

нике, однако не прошло и полугодя, как он послал в метрополию весьма пессимистический доклад о состоянии дел. Непривычный для европейцев тропический климат и тяжелые условия работы вызвали повальные болезни в гарнизоне Мартиники. За первые полгода пребывания на Мартинике два инженера умерли от тропических болезней. Рошмор был вынужден просить не только замены умерших и больных, но и увеличения группы инженеров. В противном случае, по его мнению, важнейшая стратегическая задача по укреплению французских позиций в Вест-Индии не могла быть решена.

Возможно, что все эти важные внешнеполитические события и не сказались бы на судьбе Кулона, если бы не случай. Перед отъездом на Мартинику внезапно заболел один из инженеров, направлявшихся на остров для возмещения потерь группы Рошмора. Кулон оказался единственным молодым инженером, которым можно было заменить больного, — так в феврале 1764 г. он оказался на борту военного корабля, отплывавшего к Антильским островам.

Прибыв на Мартинику, Кулон оказался в гуще событий, связанных с проектом Рошмора. Дело в том, что среди представителей флота и армейских частей, расквартированных на Мартинике, а также руководителей французской колонии на острове зрело недовольство этим проектом. Военным он казался слишком масштабным, требующим непомерных средств (15 млн. ливров) и трудовых затрат. Колонисты же, требовавшие от правительства надежной защиты от нападения англичан, в то же время не желали тратить собственные средства на строительство укреплений. В связи с этим было решено устроить военный совет с участием представителей заинтересованных сторон и всех военных инженеров, находившихся на острове. Совет должен был решить вопрос о целесообразности реализации проекта Рошмора.

На заседании совета проект Рошмора, как и ожидалось, был подвергнут критике со стороны военных и представителей гражданских властей. Даже среди инженеров не было единой точки зрения. Некоторые, например, считали, что административный центр Мартиники Форт-Рояль можно защитить, создав на ближайших к нему холмах систему траншей. Рошмор же настаивал на строительстве на вершине горы Монт-Гарнье укрепленного форта. Члены совета представили записки с выражением мнения по обсуждавшемуся вопросу. О точке зрения Кулона можно судить по следующему отрывку из его докладной записки:

«Единственной защитой Мартиники в настоящее время является Форт-Рояль, над которым доминируют горы Монт-Гарнье и Монт-Тартансон. Опыт, к несчастью, показал, насколько неудовлетворительно такое положение для обороны острова.

Поэтому следует высказаться в пользу занятия этих двух гор. Целесообразно выбрать Монт-Гарнье, которая выше, чем Монт-Тартансон, граничит по большей части с пологими склонами, окружена почти со всех сторон крутыми откосами и имеет только один участок, через который ее можно легко атаковать. В этом вопросе никогда не было затруднений. Следовательно, проблема состоит лишь в том, следует ли построить на вершине холма правильный форт или же можно избежать этих затрат и удовлетвориться простым лагерем, укрепленным окопами.

Мне кажется, если решено, что Форт-Рояля недостаточно [для защиты острова], то позиция на Монт-Гарнье должна составлять всю силу колонии. То, что из-за слабости нашего флота лишь небольшое число призывников может быть доставлено на остров и оставаться здесь во время войны в колониях, заставляет меня думать, что лагерь, окруженный окопами, будет недостаточно для этой возвышенности, поскольку данная форма обороны подразумевает примерное равенство между атакующими и осажденными. Поэтому остается только один путь, по которому следует идти для уменьшения расходов: ограничиться построением на холме простого редута¹. Однако мне кажется, что этот редут в случае осады должен служить убежищем для части сельских жителей и в то же время поддерживать жителей местечка, расположенного на равнине ниже Форт-Рояля, вследствие чего он не может иметь упрощенную структуру. Поэтому я в целом принимаю проект, предложенный месье де Рошмором, и мне представляется, что без риска невозможно избежать предложенных им затрат».

Этот отрывок дает нам представление о характере Кулона и его подходе к решению военно-инженерных задач. Одна из важнейших его черт — принципиальность в профессиональных вопросах. Голосование, проведенное на совете, дало такие результаты: Рошмор, Кулон и еще двое высказались за строительство форта на Монт-Гарнье, десять других членов совета воздержались. Таким образом, Кулон, молодой и не слишком опытный инженер, оказался в оппозиции. Очевидно, что в такой ситуации для принятия принципиального решения требовалось большое мужество. Именно его не хватало тем инженерам, которые при голосовании воздержались.

В целом план Рошмора был принят, однако общая сумма, ассигнованная на строительство, существенно сократилась: с 15 000 000 до 6 675 530 ливров. Из утвержденной суммы 6 млн. ливров предназначались для строительства форта на

¹ Редут (от франц. redoute — убежище, опорный пункт) — сомкнутое полевое укрепление прямоугольной или многоугольной формы, подготовленное к круговой обороне.

Монт-Гарнье. Работа по возведению форта была поручена Кулону.

Сложность задачи, перед лицом которой оказался Кулон, трудно переоценить. Прежде всего он не имел практически никакого опыта по организации работ такого масштаба. С самого начала работ и до момента отъезда Кулона с Мартиники, когда основные работы были практически завершены, строительство велось в условиях постоянной нехватки людей. Изредка, по-видимому, в распоряжение Кулона направлялись значительные группы строителей, но обычно их численность не превышала 200—250 человек, в то время как для окончания работ в срок требовалось около 600 строителей. Условия жизни рабочих и инженеров были крайне тяжелыми. И те, и другие жили в бараках, построенных на Монт-Гарнье. Среди строителей были распространены болезни, многие из них умирали. Смерть и болезнь коллег заставляли оставшихся инженеров работать с еще большим напряжением.

Не обходили болезни и Кулона. За восемь лет, проведенных на Мартинике, он несколько раз серьезно болел, но каждый раз возвращался к исполнению своих служебных обязанностей. Болезни эти не прошли бесследно. После возвращения во Францию Кулон уже не мог считаться совершенно здоровым человеком.

Несмотря на все эти трудности, Кулон очень хорошо справлялся со своими обязанностями. Его успехи в деле строительства форта на Монт-Гарнье были отмечены повышением в чине: в марте 1770 г. он получил чин капитана — по тем временам это можно было рассматривать как очень быстрое продвижение по службе. Во многом благодаря усилиям Кулона сооружение Форт-Бурбона (такое название получило в 1766 г. строящееся укрепление на Монт-Гарнье) уже в 1770 г. находилось в стадии завершения. В это время Кулон вновь серьезно заболел и, наконец, подал рапорт с прошением о переводе во Францию. Его начальник Лебеф, довольный работой Кулона, сначала решил вопрос о переводе положительно и направил соответствующее ходатайство в Версаль. Однако спустя несколько дней он, видимо, решил, воспользовавшись случаем, сам вернуться на родину (всего после года службы на Мартинике!) и написал новое письмо, в котором сослался на плохое самочувствие и попросил оставить Кулона на острове еще на год, а его отозвать во Францию. Действие возымело второе письмо, и в 1771 г. Лебеф уехал, а Кулон был вынужден остаться на Мартинике до июня 1772 г., когда ему было разрешено вернуться на родину.

Как же оценить годы, проведенные Кулоном в далекой заморской колонии, с точки зрения формирования его как исследователя, впоследствии обессмертившего свое имя фундаментальными открытиями? Не прошли ли они даром? Ответ

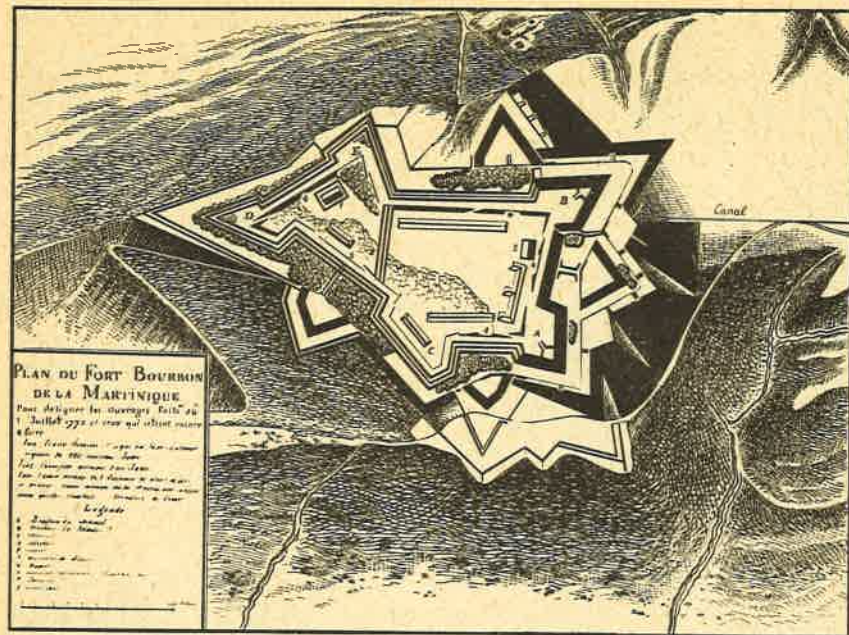


Схема крепости на Мартинике, строительством которой руководил Кулон.

на этот вопрос дал сам Кулон, написавший много лет спустя такие строки:

«В течение восьми лет я (почти всегда один) отвечал за строительство Форт-Бурбона и за работу 1200 человек и в это время часто оказывался в ситуации, когда обнаруживал, до какой степени теории, основанные на гипотезах или экспериментах, проведенных в миниатюре в *cabinet de physique*¹, оказываются неудовлетворительными ориентирами на практике. Я посвятил свою жизнь всем видам исследований, которые могут быть использованы в работах, предпринимаемых офицерами инженерных войск».

Это высказывание Кулона не следует понимать как выступление против фундаментальных исследований в физике. Оно лишь подчеркивает, какой глубокий разрыв существовал в XVIII в. между научными экспериментами и инженерной практикой. Этот разрыв ученым и инженерам зачастую приходится преодолевать еще и в наши дни...

¹ *Cabinet de physique* (дословный перевод с французского означает «физический кабинет») — термин, применявшийся в XVIII в. для обозначения собрания физических приборов, которые использовались не только для исследований, но главным образом для постановки эффектных демонстраций для широкой публики.

Таким образом, служба на Мартинике дала Кулону бесценный опыт инженера-практика, опыт проведения строительных работ такого масштаба, какие вряд ли были бы ему поручены, если бы он остался служить во Франции. Как следует из слов Кулона, именно на Мартинике определилось направление его позднейших исследований, отношение к стилю и результатам современной ему фундаментальной науки. Наконец, самостоятельная инженерная деятельность способствовала формированию идеи Кулона о применении методов высшей математики к решению практических задач строительной механики, идеи, которая была реализована в его первой научной работе.

Глава III.

ПЕРВАЯ НАУЧНАЯ РАБОТА

После возвращения на родину Кулон получил назначение в Бушен. Условия, в которых он оказался на новом месте, резко контрастировали с условиями Мартиники. В момент прибытия Кулона к новому месту службы там не велось никаких инженерных работ, и он получил досуг, которого раньше так не хватало. Однако привычка к постоянной работе помогла ему быстро завершить исследование, начатое еще во время службы в Вест-Индии.

Удивительно, но, несмотря на тяжелейшие условия жизни на Мартинике и широкий круг обязанностей военного инженера, Кулон все же находил там время для исследовательской работы. Его первые эксперименты и теоретические изыскания были непосредственно связаны с практической деятельностью, которой ему приходилось заниматься, — строительством. Это стремление перейти от решения частных практических задач к научным обобщениям стало впоследствии, как мы увидим, одной из важнейших особенностей творчества Кулона. На Мартинике молодой офицер инженерного корпуса проводил опыты в области, известной теперь как «сопротивление материалов». Наука о сопротивлении материалов — это раздел прикладной механики, занимающийся расчетом сооружений и механизмов, анализом распределения нагрузок в их частях и деталях, проблемами создания наиболее устойчивых конструкций и т. д. Все эти вопросы очень интересовали Кулона.

К середине XVIII в. теория сопротивления материалов еще не была сложившейся областью науки. С вопросами прочности и связанными с ними проблемами определения размеров

сооружений строители стилизовались с древнейших времен. Без знания элементарных правил статики было бы невозможно строительство таких грандиозных сооружений, как египетские пирамиды и обелиски, греческие храмы, римские мосты и акведуки. Некоторые элементы теории, использовавшиеся на практике, были развиты греческими учеными. Так, великий Архимед (ок. 287—212 гг. до н. э.) рассмотрел условия равновесия рычага, а также разрабатывал методы определения центра тяжести тел. Однако на протяжении многих веков отдельные факты и закономерности, относящиеся к сопротивлению материалов, не были приведены в систему, не делалось попыток их обобщения. Эксперименты по изучению прочности и других механических свойств материалов практически не проводились, и новые знания в этой области приобретались лишь в процессе практической деятельности строителей.

В эпоху Возрождения, характеризовавшуюся общим подъемом культуры, оживлением научных исследований и прогрессом техники, положение стало меняться. Например, выдающийся итальянский художник и естествоиспытатель Леонардо да Винчи (1452—1519) рассматривал задачи о равновесии сооружений, о прочности металлических проволок, изучал сопротивление балок изгибу и т. д. Но результаты Леонардо нашли отражение лишь на страницах его записных книжек и не получили распространения среди современников.

Первым, кто попытался создать логически стройную систему анализа напряжений и тем самым заложить основы общей теории расчета различных сооружений и механизмов, был выдающийся итальянский ученый Галилео Галилей (1564—1642). В 1638 г. вышла в свет знаменитая книга Галилея «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению». Первые две беседы книги почти полностью посвящены механике материалов. Галилей обсуждает вопрос о нагрузках, которые могут выдержать цилиндр, испытывающий растяжение; балка прямоугольного сечения, заделанная одним концом в стену (рис. 1), т. е. используемая как консоль и испытывающая

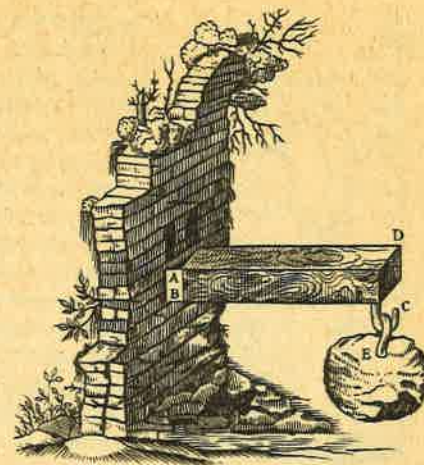


Рис. 1. Рисунок из книги Г. Галилея с изображением опыта по изучению прочности балок.

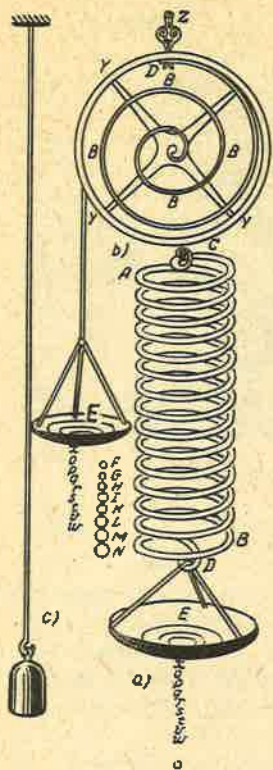


Рис. 2. Рисунок из книги Р. Гука, посвященной упругим свойствам материалов, на котором изображены опыты по исследованию деформации цилиндрической пружины (а), спиральной пружины (b) и проволоки (с).

деформацию изгиба; балка, лежащая на двух опорах, и другие проблемы. Не все результаты Галилея оказались правильными, однако его главный вывод о том, что при строительстве различных сооружений большие из них оказываются менее прочными, был верным.

После Галилея в XVII в. наиболее значительный вклад в изучение упругих свойств и прочности материалов внесли англичанин Р. Гук (1635—1703) и француз Э. Мариотт (1620—1684). Гук, исследуя деформации тел (рис. 2), установил закон упругости, названный впоследствии его именем. Закон Гука сыграл важную роль в развитии прикладной механики.

Мариотт в целом продолжил исследования Галилея. Он, в частности, показал, что нагрузка, при которой происходит разрушение балки-консоли, рассчитанная Галилеем, преувеличена, и дал более обоснованную оценку этой величины. Он же впервые сформулировал мысль о том, что если балка-консоль испытывает изгиб под действием нагрузки (рис. 3), то различные части этой балки деформируются по-разному. Волокна материала, из которого изготовлена балка, в верхней ее части (над линией IF) испытывают растяжение, а в нижней части (под указанной линией) — сжатие. Деление балки на части в зависимости от характера испытываемых ими деформаций сохранилось и в современной науке.

Конец XVII в. в истории науки ознаменовался двумя важнейшими событиями — разработкой основ механики (И. Ньютон) и созданием дифференциального и интегрального исчисления (И. Ньютон, Г. В. Лейбниц и др.). Оба события сыграли важную роль в прогрессе теории упругости. Для решения задач этой теории стали применяться новые аналитические методы, что позволило получить важные результаты (братья Бернулли, Л. Эйлер и др.). Однако в инженерную практику достижения теоретиков входили очень медленно. Это объяснялось как сложностью нового математического аппарата, использовавшегося теоретиками, так и отличиям приближений, в кото-

рых были введены те или иные формулы, от реальной инженерной практики.

В годы, предшествующие началу работы Кулона в области строительной механики, наибольшее распространение среди инженеров-практиков имела книга французского инженера Белидора (1697—1761) «Инженерная наука», первое издание которой вышло в 1729 г. По существу в области теории Белидор не пошел дальше Галилея и Мариотта, но в своей книге рассмотрел ряд новых, важных с практической точки зрения задач. Надо отметить, что Белидор был также автором учебника математики, написанного специально для военно-инженерных учебных заведений. Хотя в этом учебнике рассматривались лишь вопросы элементарной математики, там указывалось, что для более глубокого освоения инженерной науки следует изучать анализ бесконечно малых.

Кулон, получивший хорошее по тем временам математическое образование, был знаком с трудами Белидора. Он внимательно изучил также сочинение своего учителя по Военно-инженерной школе в Мезьере Боссю «Наивыгоднейшее возведение плотин». Таким образом, приступая к исследованиям на Мартинике, Кулон был в курсе наиболее актуальных инженерных проблем своего времени. Его экспериментальные и теоретические изыскания были обобщены в работе «О применении правил максимумов и минимумов к некоторым вопросам статики, имеющим отношение к архитектуре». Во введении к этой работе начинающий исследователь поясняет обстоятельства ее появления. «Этот мемуар, написанный мною несколько лет тому назад, предназначался в первую очередь для личного пользования в работе, которую мне приходится выполнять в соответствии со своей профессией. Если я отважусь теперь представить его академии, то только потому, что эта последняя приветствует и самые скромные старания, если они направлены на полезные цели. Кроме того, наука — это монумент, воздвигаемый ради блага общества. Каждый гражданин должен внести в него что-нибудь сообразно своим талантам. В то время как великие люди поднимаются к вершине здания, где они получают возможность размечать и строить верхние этажи, остальным работникам, рассеянным по нижним этажам или же скрытым во тьме подвалов, нужно стремиться окончательно отделать то, что уже создано более умелыми руками».

Хотя Кулон с присущей ему скромностью относил себя к «остальным работникам», в действительности многие идеи,

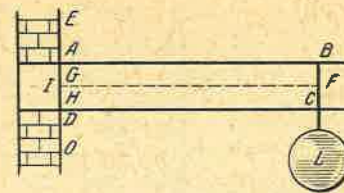


Рис. 3. Рисунок из работы Э. Мариотта, посвященной сопротивлению материалов.

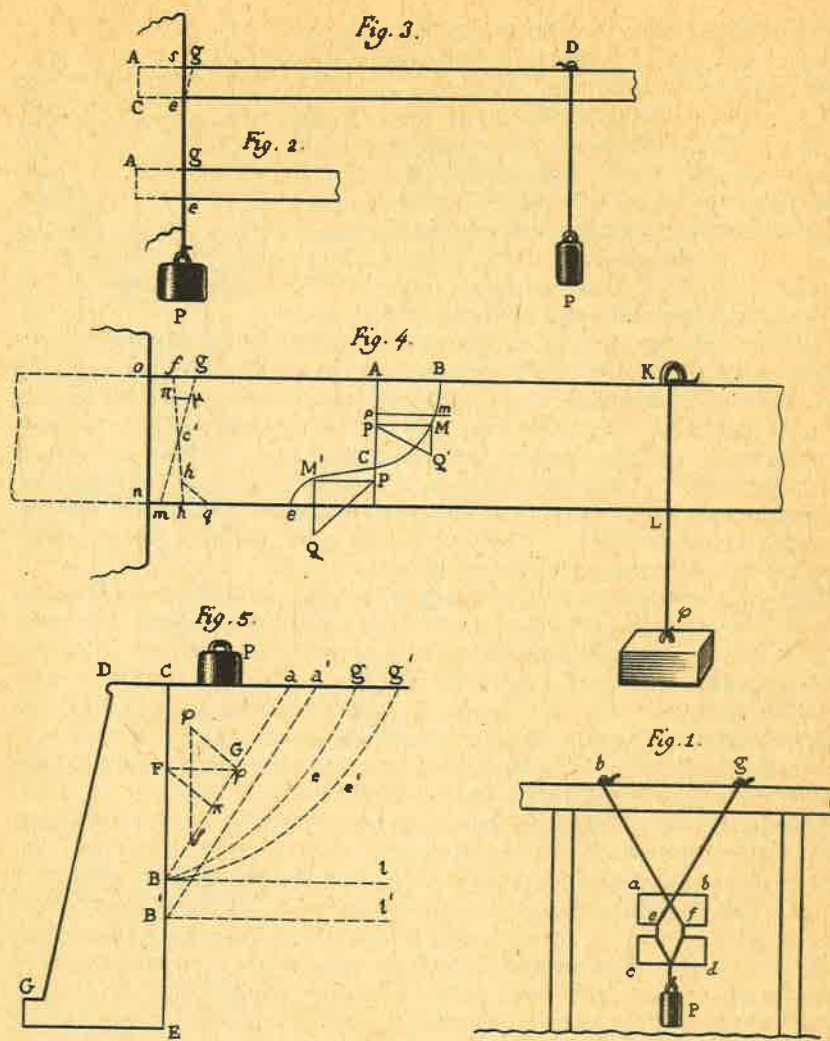


Рис. 4. Рисунки из мемуара Кулона «О применении правил максимумов и минимумов...». Видны многочисленные вспомогательные построения, на основе которых Кулон проводил свои расчеты.

сформулированные им в первой же научной работе, до сих пор рассматриваются специалистами по сопротивлению материалов как основополагающие. Кулон исследовал четыре вопроса. Первый связан с проблемой прочности материалов, второй касается теории изгиба балок, третий — расчета давления земли на подпорные стены и четвертый — теории расчета арок (или сводов).

В своем исследовании Кулон сочетал эксперимент и теорию. Он, в частности, испытывал на растяжение образцы из песчаника, которым придавал форму, показанную на рисунке 4.1¹. Исследователь обнаружил, что предел прочности, т. е. напряжение, при котором происходит разрыв образца, составляет $\approx 1,5 \cdot 10^6$ Н/м². Этот же материал Кулон испытывал на срез: образец заделывался одним концом в стену (рис. 4.2, участок Ag) и в сечении задела прикладывалась сила P. Он обнаружил, что предел прочности при срезе оказывается равным пределу прочности при растяжении. Наконец, Кулон ставил опыты по исследованию материала на изгиб (рис. 4.3).

При теоретическом анализе перечисленных выше проблем, который проводился с использованием полученных экспериментальных результатов, Кулон учитывал два физических явления — трение и сцепление². Об этих явлениях он писал так:

«О трении»

Трение и сцепление суть не активные силы, подобно тягости, которая всегда проявляет свой эффект целиком. Это силы коэрцитивные; они оцениваются пределом их сопротивления. Например, когда утверждается, что для определенного сорта полированного дерева трение на горизонтальной плоскости составляет три фунта для тела, весящего девять фунтов, это означает, что сила, меньшая трех фунтов, не нарушит его состояния равновесия.

Здесь я буду полагать, что прочность, обусловленная трением, пропорциональна сжимающей силе, как было обнаружено Амонтоном, хотя для больших тел трение не подчиняется в точности этому закону. В соответствии с данным предположением было обнаружено, что для кирпича трение равно трем четвертым сжимающей силы. Следовало бы провести испытания и для других используемых [в строительстве] материалов. Здесь невозможно говорить о трении камня, поскольку испытания, проведенные для одной каменоломни, неприменимы для другой.

О сцеплении

Сцепление измеряется сопротивлением, которое оказывают твердые тела прямому разъединению их частей. Поскольку каждый элемент твердых тел, если они однородны, обладает

¹ В этой книге воспроизводятся факсимильные рисунки из мемуаров Кулона. При ссылке на отдельные части рисунка здесь и далее в тексте применяется сокращенная запись, например вместо рис. 4 (Fig. 1) дается рис. 4.1 и т. д.

² В современной физике термин «сцепление» не применяется. В XVIII и начале XIX в. им обозначали силы взаимодействия между частями тела, которые, как мы знаем, обусловлены межмолекулярным взаимодействием. Во времена Кулона представления о строении тел были еще крайне неопределенными, что и отразилось в терминологии.

одной и той же прочностью, общее сцепление пропорционально числу частей, которые должны быть разрушены, и, следовательно, площади разрыва».

Таким образом, в своей первой научной работе при рассмотрении трения и сцепления Кулон пользуется еще результатами чужих исследований, хотя и указывает на их неполноту. Эта неудовлетворенность чужими результатами через несколько лет приведет ученого к постановке важнейшего цикла экспериментов, касающихся трения.

Сформулировав основные посылы, Кулон переходит к анализу конкретных проблем. Сначала он строит теорию изгиба балок. Независимо от других исследователей, он приходит к правильному выводу о том, что при изгибе (рис. 4.4) верхняя часть балки испытывает растяжение, а нижняя — сжатие. В сечении балки можно указать линию, на которой напряжение равно нулю. Такая линия называется нейтральной. Кулон рассматривает, как распределены напряжения в изогнутой балке по обе стороны нейтральной линии, и строит кривые (*BCe*), характеризующие напряжение в растянутой и сжатой зонах (так называемые эпюры напряжений). Разбирая на основе построенной теории и полученных экспериментальных данных исследования изгиба балок, проведенные Галилеем, Кулон приходит к справедливому выводу о том, что у Галилея сопротивление изгибу преувеличено, и указывает на возможные причины ошибки. Один из крупнейших современных специалистов по сопротивлению материалов С. П. Тимошенко по поводу этой части работы Кулона писал: «Мы убеждаемся, таким образом, что в своей теории изгиба Кулон правильно применил уравнения статики при исследовании внутренних сил и имел ясное представление о распределении этих сил по поперечному сечению балки».

Следующая проблема, рассмотренная Кулоном, касается давления земли на подпорные стены. При возведении различных земляных фортификационных сооружений часто требовалось определить уровень, до которого следует насыпать грунт, чтобы он не разрушал стену (рис. 4.5 из работы Кулона иллюстрирует эту задачу). Хотя в целом рассуждение Кулона небезупречно, предложенный им метод практического расчета давления сыпучих тел на подпорные стены используется еще и в наши дни.

Последняя задача, которую обсуждает Кулон, — это расчет свода. Он ставит ее так: «Внутреннее и наружное очертания свода даны, швы перпендикулярны внутренней кривой. Ищутся пределы величины распора, способного поддержать свод, в предположении, что последний нагружен собственным весом и сдерживаем трением и сцеплением в швах»¹ (рис. 5). При

¹ Распором в строительной механике называют горизонтальную составляющую реакции опоры.

решении этой задачи Кулон предположил, что для определения устойчивости свода необходимо учитывать не только вероятное относительное скольжение клиньев, из которых собирается арка (как делали его предшественники), но также и возможность их относительных поворотов (рис. 6). Это позволило Кулону провести более реалистичное рассмотрение проблемы. Следует, однако, отметить, что эта часть работы Кулона не была оценена по достоинству его современниками, предпочитавшими пользоваться устаревшей теорией Деллагира. Лишь в XIX в. идеи, выдвинутые Кулоном, стали широко применяться при строительстве арочных сводов.

По традиции того времени Кулон представил свой мемуар в Парижскую академию наук, которая принимала к рассмотрению и работы авторов, не входивших в ее состав. Впоследствии, когда Кулон сам стал академиком, ему часто приходилось выступать экспертом по работам других ученых.

Кулон зачитал мемуар на двух заседаниях академии в марте и апреле 1773 г. Работа была воспринята с одобрением; окончательное суждение о ее достоинствах было поручено высказать двум академикам, работавшим в смежных областях и хорошо знавшим Кулона, — Боссю и Борда (1733—1799). Первый, как мы помним, был учителем Кулона в Мезьере, а второй, так же как и Кулон, выпускник Мезьерской школы, военный инженер, познакомившийся с Кулоном во время его службы в Бресте. На протяжении многих лет после обсуждения первой работы Кулона в академии научные и жизненные пути

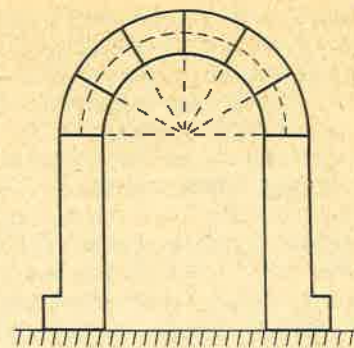


Рис. 5. К анализу устойчивости арочных перекрытий. Очертание свода, собранного из отдельных клиньев.

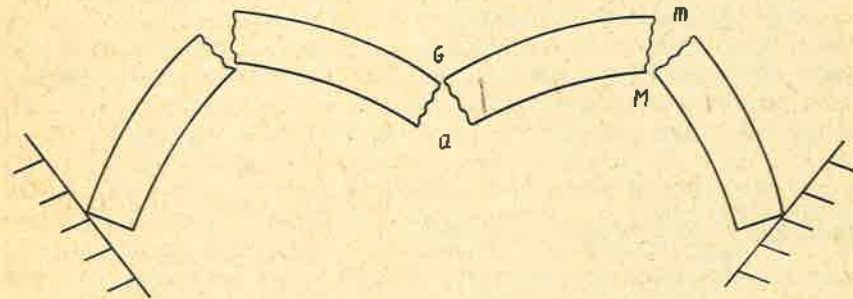


Рис. 6. Схематическое изображение разрушения свода вследствие относительного поворота клиньев.

Борда и Кулона пересекались. У них было много общих друзей, да и между собой они были достаточно близки — в период якобинской диктатуры во время Великой французской революции Борда скрывался в поместье Кулона.

Оба академика высоко отзывались о работе начинающего исследователя. Боссю, в частности, писал:

«Под этим скромным названием (имеется в виду название работы Кулона. — С. Ф.) мсье Кулон охватил, так сказать, всю архитектурную статику... Повсюду в его исследовании мы отмечаем глубокое знание анализа бесконечно малых и мудрость в выборе физических гипотез, а также в их применении. Поэтому мы полагаем, что эта работа вполне заслуживает одобрение академии и достойна публикации в Собрании [работ] иностранных ученых»¹.

Положительная реакция на первую научную работу была для Кулона важной в двух отношениях. Во-первых, она укрепила его веру в собственные силы, побудив тем самым к дальнейшим исследованиям. Во-вторых, он, как исследователь, попал в поле зрения академии. Это второе обстоятельство нашло свое выражение в назначении Кулона в 1774 г. корреспондентом Боссю². Для Кулона положение корреспондента Боссю означало не столько возможность представления работ в академию, сколько вселяло надежду на возможность быть избранным в ее состав, что в значительной степени облегчило бы ему проведение научных исследований. Однако до избрания Кулона в академию оставалось еще долгих шесть лет, в течение которых он исправно нес службу как военный инженер.

Глава IV.

СЛУЖБА НА РОДИНЕ

Служба в Бушене, ознаменованная первыми научными успехами Кулона, была недолгой. В 1774 г. его переводят в крупный порт Шербур. Кулон был рад этому назначению — он считал, что именно в портовом городе военный инженер может найти наилучшее применение своим знаниям и способностям.

¹ Работа Кулона была помещена в издание трудов иностранных ученых, по-видимому, потому, что она была подготовлена в заморской колонии, на Мартинике, а не в пределах Франции.

² Не следует путать понятие «член-корреспондент Академии наук» — звание, присваиваемое, например, в АН СССР, которое является первой ступенью в академической табели о рангах, с понятием «корреспондент какого-либо академика» Парижской академии наук, не указывавшим на принадлежность к академии, а лишь облегчавшим представление работ на ее рассмотрение.

В Шербуре, где Кулон служил до 1777 г., он занимался ремонтом ряда фортификационных сооружений. Эта работа оставляла достаточно большой досуг, и Кулон продолжил свои научные исследования. Основной темой, которой интересовался в это время Кулон, была разработка оптимального метода изготовления магнитных стрелок для точных измерений магнитного поля Земли. Эта тема, очень далекая от предмета его первой научной работы, привлекла молодого исследователя, поскольку, с одной стороны, имела очевидную практическую направленность, а с другой — была задана на конкурсе, объявленном Парижской академией наук.

Конкурсы, посвященные актуальным проблемам науки и техники, во второй половине XVIII в. были в Парижской академии наук уже традицией. Они объявлялись ежегодно с 1720 г.; премии победителям конкурсов выплачивались из средств, завещанных академии Руйе де Месле, бывшим советником Парижского парламента. Постепенно конкурсы Парижской академии превратились по существу в международные соревнования ученых и изобретателей. Они сохраняли свое значение и в XIX в.

История первого конкурса, в котором Кулон решил принять участие, такова. В 1775 г. академия объявила в качестве конкурсной задачу: «Изыскание лучшего способа изготовления магнитных стрелок, их подвешивания и проверки совпадения их направления с направлением магнитного меридиана и, наконец, объяснение их регулярных суточных вариаций». Тема эта представлялась во второй половине XVIII в. актуальной по многим причинам. С XII в., когда европейцы познакомились с компасом, этот прибор использовался в практике навигации. Поначалу применение компаса основывалось лишь на фактах, известных из практического опыта людей. Затем компас привлек внимание ученых и его свойства стали тщательно исследоваться. Одновременно возникла проблема объяснения действия Земли на магнитную стрелку. Важной вехой в изучении этого круга проблем стала книга английского врача и естествоиспытателя У. Гильберта «О магните, магнитных телах и большом магните — Земле», вышедшая в Лондоне в 1600 г. Гильберт показал, что действие Земли на магнитную стрелку очень похоже на действие, которое оказывает на эту стрелку намагниченный шар. Постепенно выяснилось, что, говоря современным языком, вид магнитного поля Земли достаточно сложен. В частности, было установлено, что магнитные полюса Земли не совпадают с географическими и плоскость магнитного меридиана ориентирована под некоторым углом к плоскости географического меридиана; этот угол получил название угла магнитного склонения. Были также обнаружены аномалии магнитного поля Земли (связанные, как выяснилось впоследствии, с особенностями геологического

строения некоторых областей на Земле). Нужды навигации требовали уточнения данных о поведении магнитной стрелки в различных точках Земли, и в 1701 г. выдающийся английский астроном Э. Галлей опубликовал первую магнитную карту, при составлении которой он использовал наблюдения моряков.

Во второй половине XVII в. в ряде стран уже начали вести систематические наблюдения за магнитным полем Земли. По мере усовершенствования методов наблюдений было обнаружено, что действие Земли на магнитную стрелку подвержено временным изменениям, причем наиболее интенсивные изменения были связаны с атмосферными процессами (полярные сияния). Кроме того, обнаружилось, что ориентация стрелки испытывает регулярные периодические возмущения. В частности, были отмечены небольшие суточные колебания магнитного склонения. Исследование этих колебаний могло пролить свет на природу магнетизма в целом, поэтому их измерения рассматривались учеными второй половины XVIII в. как важная физическая задача.

Решение этой задачи осложнялось тем, что для измерения суточных вариаций магнитного склонения обычные компасы не годились. В навигационной практике использовали компасы, стрелки которых опирались на острие, что обеспечивало необходимую устойчивость системы, но в то же время было связано с трением между стрелкой и иглой. Это так называемое внешнее трение характеризуется явлением застоя: для того чтобы изменить положение стрелки, к ней необходимо приложить определенную силу. Поскольку изменение силы, действующей на магнитную стрелку, обусловленное суточными колебаниями магнитного склонения, невелико, то явление застоя препятствует проведению точных измерений эффекта. Поиски способа преодоления этой трудности и составляли суть задачи, поставленной Парижской академией наук.

На конкурс 1775 г. в академию было подано несколько работ, но ни одну из них не удостоили денежной премии. Ввиду важности проблемы через год было решено повторить конкурс. На этот раз, в 1777 г., победителями были объявлены сразу двое — шведский ученый ван Швинден, уже выдвигавший работу на конкурс в 1775 г., и Кулон.

Конкурсное сочинение ван Швиндена представляло собой объемный трактат (более 500 страниц!), в котором автор тщательно анализировал традиционные методы измерения магнитного склонения с помощью стрелок, опирающихся на острие. Хотя ряд наблюдений шведского ученого представлял интерес, а его критика методов измерений, использовавшихся предшественниками, была в основном справедливой, работа ван Швиндена не стала принципиально новым шагом в деле усовершенствования геомагнитных измерений. Иначе обстояло дело с работой Кулона.

Кулон считает поставленную академией задачу исключительно важной. Поэтому он начинает свой конкурсный мемуар с торжественного вступления:

«В то время, когда все части Земли объединены соответствующими потребностями и обменом своих излишков, когда армии и нации всего мира бороздят и обживают моря, ученые, также чувствующие свою ответственность перед лицом общественного блага и собственного гения, предлагают физикам и геометрам для исследования усовершенствование инструмента, который направляет движение судов, который, будучи помещен в центре обширной и однородной горизонтальной поверхности, укажет линию, направление которой известно; это служит человечеству и родине...»

Важность предложенной задачи заставляет Кулона подойти к ее решению с общих позиций. Он в отличие от ван Швиндена не стал рассматривать мелкие усовершенствования традиционных методов, а исследовал возможности повышения точности измерений при помощи стрелок, подвешенных на тонких нитях. Правда, сама идея о подвешивании магнитной стрелки не принадлежала Кулону — она родилась еще в конце XVII в. Однако до Кулона эта идея не получила практической реализации по причине неустойчивости системы с нитяным подвесом. Кроме того, использование нити для подвешивания стрелки в измерительном приборе требовало исследования упругих свойств нити по отношению к кручению. Эти исследования до Кулона еще не были проведены.

В начале конкурсного мемуара Кулон теоретически анализирует силы, которые могут влиять на положение магнитной стрелки и определять ее состояние равновесия в горизонтальной плоскости. Затем он переходит к обсуждению методов намагничивания стрелок, особенно подробно обсуждая способ, который получил название метода двойного касания: для намагничивания стрелки вдоль нее от центра к концам несколько раз проводят разноименными концами (северным *N* и южным *S*, рис. 7) двух полосковых магнитов. С характерной для Кулона тщательностью он исследует далее «силу» намагниченной стрелки в зависимости от ее длины, ширины и толщины, а также особенности составных намагниченных стрелок.

Однако для истории науки наибольший интерес представляет все же не глава мемуара Кулона, посвященная магнитным стрелкам, а следующая глава, где анализируются механические свойства нитей, на которых подвешивают стрелки. Следует отметить, что в этой главе, как и во многих других работах, Кулон исследует вопрос гораздо глубже, чем того

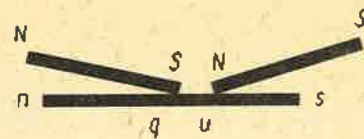


Рис. 7. Метод «двойного касания», с помощью которого Кулон намагничивал железные и стальные стрелки.

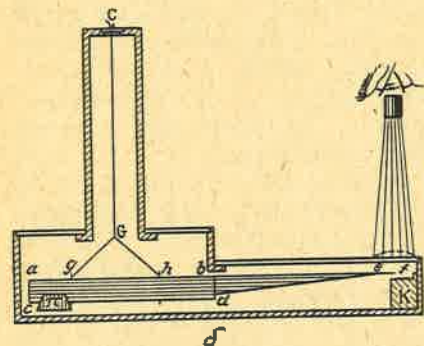
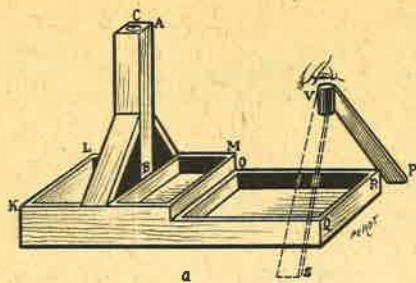


Рис. 8. Прибор Кулона для измерения вариаций магнитного поля Земли: а) внешний вид; б) сечение прибора.

требовала первоначально поставленная задача. Хотя он с помощью опытов доказывает, что упругостью шелковых нитей и тонких волосков, использовавшихся для подвеса стрелки, в случае измерения вариации магнитного склонения можно пренебречь, его не удовлетворяет констатация этого факта. Он стремится установить количественные закономерности, отражающие упругие свойства нити по отношению к деформации кручения. Ученый провел цикл экспериментов для определения зависимости момента силы деформации кручения M от угла закручивания нити и от ее параметров: длины и диаметра. В целом Кулону удалось решить эту задачу, хотя в полученной им формуле имелись неточности (был неверно определен показатель степени диаметра нити). Однако Кулон и сам не был уверен

в правильности полученной формулы. Он писал, что «трудность измерения диаметра волоса или очень тонкой шелковой нити и проверки их однородности по длине приводит к разбросу в результатах». Тем не менее ученому удалось установить общий характер зависимости M от параметров нити.

Кроме упругих свойств нити, Кулон изучал также влияние воздуха на колебания стрелки, подвешенной на нити. Для этого он следил за затуханием колебаний стрелки, на которой укреплялся листок навощенной бумаги, причем в одной серии наблюдений этот листок располагался горизонтально, а в другой — вертикально. Во втором случае сопротивление воздуха оказывалось, конечно, значительно большим, чем в первом.

Хотя, как мы уже говорили, именно эти результаты были важнейшими в конкурсном мемуаре Кулона, сам автор все же рассматривал их лишь как подготовку к главной цели работы: созданию чувствительного прибора для изучения магнитного поля Земли. Итогом экспериментов и поисков наилучшей конструкции прибора стало устройство, показанное на рисунке 8. АВ — это вертикальный кожух высотой 20 дюймов, внутри

которого находится шелковая нить CG (см. рис. 8, б). Верхняя часть кожуха ALKQPM сделана из стекла. На нити подвешивалась стальная полоска длиной 10 дюймов и шириной около 0,25 дюйма, весившая 250 гран¹. На полоске с одного конца был закреплен небольшой медный противовес (μ), а на другом — очень тонкий медный указатель (de , см. рис. 8, б). Над заостренным концом стрелки Кулон поместил увеличительное стекло f . Для упрощения достижения равновесия стрелки Кулон прикрепил к ней шелковую нить в двух точках — g и h . Напротив острого конца стрелки помещалась шкала K , по которой через увеличительное стекло можно было отсчитывать показания прибора. С помощью прибора такой конструкции можно было регистрировать суточные колебания магнитного склонения в пределах нескольких минут дуги.

Кулон использовал свой прибор для проведения серии измерений. Он обнаружил, что амплитуда изменения отклонения достигает 61 мин, причем его максимум приходится примерно на час дня. На основе этих наблюдений Кулон попытался объяснить происхождение вариаций склонения. Он в отличие от многих современников не принял точку зрения, заключающуюся в том, что изменение склонения обусловлено воздействием солнечного тепла на земной магнетизм, подобно тому как нагрев намагниченного железа уменьшает «силу» магнита. Кулон полагал, что здесь основную роль играют процессы, происходящие в атмосфере Солнца.

Хотя это и не входило в задачу конкурса, Кулон все же высказал в мемуаре некоторые соображения о распространенных в то время взглядах на природу магнетизма. Не вдаваясь в подробности, касающиеся этих соображений, отметим, что критика воззрений современников была обоснована опытными фактами и выглядела вполне убедительно. Однако развернутого изложения своих представлений о природе магнетизма Кулон не дал.

Мемуар Кулона, премированный Академией наук, оказался очень важным для дальнейшей научной судьбы Кулона. Прежде всего получение премии значительно упрочило его положение в академии и позволяло надеяться на избрание в ее состав. Кроме того, Кулон изобрел устройство, на многие десятилетия определившее пути развития методов измерения земного магнетизма. Впоследствии Кулону еще придется вернуться к этой теме. И все же самое важное состоит в том, что в этом мемуаре можно отметить в зародыше большинство проблем, изучение которых обессмертит имя Кулона. К этим проблемам относятся: внешнее и внутреннее трение, деформация кручения и возможность ее использования для создания измерителей малых сил, магнитные взаимодействия.

Однако подготовка конкурсного мемуара — не единственное

¹ 1 гран = $5,21 \cdot 10^{-4}$ Н.

занятие, которому Кулон посвящал часы досуга в Шербуре. Здесь же он заканчивает еще одну работу, начатую на Мартинике. Ее название можно установить лишь по протоколу заседания Парижской академии наук, на котором она была прочитана, поскольку Кулон не опубликовал эту работу, а ее рукопись не сохранилась: «О пределах силы человека и о невозможности имитации полета птиц». Тема, отраженная в названии, относится к разделу физики, который называется теперь биомеханикой. В XVIII в., когда использование мускульных усилий человека еще составляло основу многих видов производства, вопрос об эффективности применения мускульной силы стоял очень остро. Впоследствии ученый еще не раз обращался к этой теме.

Постепенно Кулон все сильнее втягивался в научную работу, хотя нельзя сказать, что он безразлично относился к своим обязанностям военного инженера. Во время пребывания в Шербуре он подготовил докладную записку с проектом преобразования Военно-инженерного корпуса. История этого сочинения Кулона такова.

В 1774 г. умер король Франции Людовик XV. Он не оставил о себе благодарной памяти — историки оценивают годы его правления как период самодискредитации королевской власти. Наследник престола, девятнадцатилетний Людовик XVI, в начале своего царствования попытался восстановить пошатнувшийся престиж власти короля. Он удалил нескольких сановников — приближенных Людовика XV, вызывавших особенно острую ненависть народа, и назначил на должность генерального контролера (министра) финансов популярного в кругах буржуазии Робера Тюрго. Король рассчитывал, что Тюрго удастся улучшить финансовое положение государства, которое находилось на грани катастрофы. Новый министр предложил Людовику XVI план реформы, основная мысль которого состояла в установлении режима строгой экономии.

Хотя предложения Тюрго касались главным образом экономических проблем, они оказали влияние и на другие сферы жизни государства. Новый военный министр граф де Сен-Жермен решил провести реорганизацию Военно-инженерного корпуса, деятельность которого не раз вызывала нарекания. Он обратился с призывом представить предложения по структуре и задачам нового корпуса. Именно с предполагавшимися реформами и была связана докладная записка Кулона, названная им «Мемуар о службе офицеров Военно-инженерного корпуса».

Мемуар начинался такими строками: «Корпус военных инженеров должен рассматриваться с двух точек зрения: как собрание дарований и как военное подразделение». Именно с этих позиций Кулон анализировал положение, сложившееся в корпусе, и формулировал свои предложения. Он, в частности, писал:

«Бросим взгляд на настоящее положение Военно-инженерного корпуса. Мы не ведем непрерывных войн, и не все войны являются осадными. В мирное время новая крепость строится в лучшем случае один раз в пятьдесят лет; таким образом, 400 [военных] инженеров заняты только восстановлением нескольких старых стен на их древних фундаментах и поддержанием военных строений в удовлетворительном состоянии. Это занятие в точности соответствует занятиям частного лица, которое следит за состоянием своего дома или восстанавливает ограду своего сада».

Главный недостаток, порождающий такое положение дел, с точки зрения Кулона, состоит в том, что войска в мирное время не используются на общественных работах. «Мы имеем 150 тысяч солдат, выбранных в данном случае из самого цвета нации. Почему их держат без пользы в гарнизонах в мирное время? Их дух расслабляется, тела слабеют...

Если бы войска заставляли выполнять всяческие общественные работы под руководством инженеров, они возвращали бы Франции средства, необходимые на их содержание, вместо того чтобы их растрачивать».

Таким образом, Кулон считает, что только общественно полезная деятельность может сохранить и развить дарования, заложенные в молодых офицерах корпуса.

С другой стороны, современная организация корпуса военных инженеров, по мнению Кулона, неудовлетворительна и с военной точки зрения. Так, строительство портовых городов, являющихся главными пунктами обороны страны, ведется гражданским ведомством мостов и дорог. Гражданское же строительство имеет цель, противоположную военному: первое стремится возвести как можно более пышные сооружения, второе — создать наименее заметные и неуязвимые для врага объекты. В итоге происходит ненужная трата средств, поскольку при возникновении военной угрозы портовые города приходится перестраивать.

Кулон указывает и на другие организационные недостатки. В частности, разделение минерных, саперных, артиллерийских и инженерных служб приводит во время военных действий к неразберихе, потере времени, средств и в конечном счете к затруднениям в ведении военных действий. Кулон предлагает объединить эти части и учредить во всех провинциях специальные комитеты для общей координации военно-инженерных работ. В мемуаре Кулона содержится и ряд других предложений, например о проведении конкурсов на лучший проект оборонительных сооружений, строительство которых требовало больших материальных затрат.

Кулон, как и многие его современники, чувствовал настоятельную необходимость в изменении существующего порядка. Однако он в отличие от более радикальных мысли-

телей в своих предложениях не шел дальше частных преобразований, не видел в королевской власти основной причины всех бед Франции. В этом состояла ограниченность его взглядов. В то же время в мемуаре отчетливо проявляется чувство гражданского долга, свойственное Кулону. Казалось бы, спокойная жизнь офицера Военно-инженерного корпуса в мирное время должна была бы как нельзя более устраивать Кулона, ибо позволяла проводить интересующие его исследования. Но с государственной точки зрения такое положение было явно неудовлетворительным, и Кулон заявил об этом четко и ясно.

Предложения Кулона, конечно, не могли быть полностью реализованы в условиях доживающего свой век монархического строя. Однако некоторые из них были учтены при реформе корпуса (например, была образована группа из тридцати управляющих фортификационными сооружениями). В целом мемуар был с одобрением воспринят руководством корпуса, что способствовало укреплению авторитета Кулона и его дальнейшему продвижению по службе.

В 1777 г. Кулона переводят на восток Франции, в Безансон, где ему приходится заниматься ремонтом форта и других инженерных сооружений в небольшом городке Салэн. И здесь Кулон находит возможность для проведения научных исследований. Он пишет для военного министерства мемуар, «содержащий описание понтонного моста со шлюзами, которые могут быть свободно использованы для работы под водой с целью очистки канала или для закрытия сухого дока», а также «сочинения о средствах устранения трения в арочных заслонках и придания им такой же подвижности, какой обладает плавающее тело». Еще один мемуар, посвященный механике, который был написан в Безансоне, назывался «О наивыгоднейшем способе приложения силы для приведения машины в движение». Эту работу, содержащую оригинальные результаты, Кулон представил в Парижскую академию наук. Вообще он пользовался любой возможностью для выступления в академии, а поскольку его непосредственный начальник д'Омаль был очень высокого мнения о деятельности и способностях Кулона, то охотно предоставлял своему подчиненному возможность зачитывать свои работы в Париже. Так, в 1778 г. на заседаниях академии Кулон прочитал мемуары о пределах силы человека и наивыгоднейшем способе приложения сил.

Подготовка мемуара для военного министерства, который носил обзорный характер, привлекла внимание Кулона к еще одной практически важной теме — проведению подводных инженерных работ. Этот интерес обострился в связи с объявлением Руанской академии конкурса, цель которого формулировалась так: «Предлагается удалить валун, постоянно покрытый водой, который мешает навигации на Сене вблизи Кильбефа». Тема, как мы видим, совершенно конкретная. Но Кулон, как обычно,

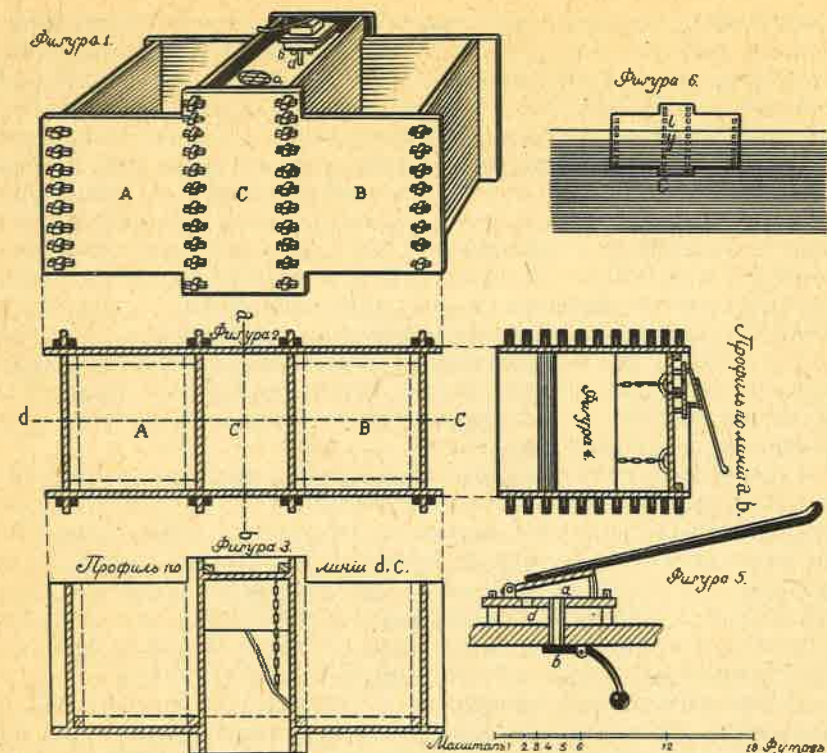


Рис. 9. Устройство Кулона для проведения подводных работ: фигуры 1—3 — три камеры устройства; фигуры 4—5 — меха, предназначенные для нагнетания воздуха в среднюю камеру устройства Кулона. Они приводились в действие усилиями четырех рабочих; фигура 6 иллюстрирует принцип действия камеры.

решая частную техническую задачу, приходит к важным обобщениям и разрабатывает метод ведения работ под водой, использовавшийся в течение многих десятилетий. Однако подготовленный Кулоном мемуар «Изыскание средств произведения под водой гидравлических работ всякого рода без использования какой-либо откачки» так и не был представлен на конкурс. Работа Кулона показалась его друзьям столь важной, что они посоветовали ему, не теряя времени, направить ее в Парижскую академию наук. Кулон так и поступил, справедливо считая, что успех работы в Парижской академии будет в значительно большей степени способствовать его заветной цели — избранию в академию, чем победа в конкурсе, проводимом провинциальным научным объединением.

Устройство для подводных работ, разработанное Кулоном, показано на рисунке 9. Оно состояло из трех камер, полная длина которых составляет около 8 м, а ширина — 3 м. Крайние

камеры А и В имеют пол, через который не проходит вода, средняя лишена пола, причем ее сруб выступает по отношению к нижнему срезу срубов камер А и В. Таким образом, устройство образует как бы понтон. У средней камеры, кроме того, имеется потолок, через который не может проходить воздух. В потолке сделаны три люка, один из которых предназначен для спуска рабочих и освещения камеры, второй соединен со специальными мехами (см. рис. 9.4—5), применяемыми для нагнетания воздуха в камеру; через третий люк при необходимости выпускался отработанный воздух. Стены средней камеры обиты свинцовыми пластинами, и она герметизирована с помощью глиняной обмазки. Принцип действия устройства Кулона состоит в том, что при нагнетании воздуха в среднюю камеру вода, частично ее заполняющая, вытесняется под действием давления воздуха и объект, который требуется подвергнуть обработке, выступает над водой.

В мемуаре Кулон подробно обсуждает детали своего устройства и делает оценки, доказывая реалистичность проекта. Интересно, что он уделяет внимание не только эффективности предложенного им метода проведения подводных работ, но и касается вопросов безопасности работающих. Отметим, что при расчетах глубины осадки устройства Кулон пользовался результатами исследований других ученых. В целом мемуар свидетельствует о хорошем знании Кулоном физики.

Когда работа над мемуаром о подводных камерах была закончена, Кулон неожиданно получил новое назначение, на этот раз в крупнейший город-порт на средиземноморском побережье Франции — Марсель. Правда, выехать в Марсель он, по-видимому, так и не успел — этому помешало печальное событие в личной жизни Кулона — смерть матери.

Госпожа Кулон после разрыва с мужем продолжала жить с дочерьми в Париже, будучи обладательницей довольно значительных средств. Поскольку размолвка с матерью, вызванная отказом Кулона стать медиком, по возвращении его с Мартиники была забыта, то согласно завещанию он должен был получить часть наследства матери (остальное получали сестры). Однако после кончины госпожи Кулон ее собственность оказалась в руках дельца с сомнительной репутацией и, не успев похоронить мать, Кулон вынужден был заняться устройством финансовых дел семьи, что потребовало больших усилий. Правда, и в этот сложный период жизни Кулон нашел время для науки: он выступил в академии с мемуаром о подводных работах. Как и предсказывали друзья, это исследование было встречено с большим интересом и рекомендовано к печати.

Первое издание мемуара вышло в свет в том же 1779 г. По словам биографа Кулона С. Гилмора, этот мемуар стал «бестселлером»; впоследствии он еще трижды переиздавался (1797, 1819 и 1846 гг.). Исследование, посвященное подвод-

ным работам, было замечено не только во Франции, но и за рубежом. Например, в 1790 г. в Москве был издан его перевод на русский язык¹ (рис. 10). Отметим, что это едва ли не единственная работа Кулона, которая была полностью переведена на русский язык.

Решить все проблемы, связанные с делом о наследстве, Кулон не успел. В Париже он получил приказ срочно прибыть в Рошфор — город на западном побережье Франции. Так, числясь в Тулонской инженерной бригаде, расквартированной в Марселе, Кулон оказался вовлеченным в реализацию проекта на атлантическом побережье, который с полным основанием можно назвать авантюрным.

Надвигалась очередная война с Англией². Французское правительство хотело укрепить западное побережье страны. Однако времени на строительство было очень мало — буквально считанные месяцы, да к тому же казна была почти пуста. Как выйти из этого положения? В условиях ограниченного времени и недостатка средств прекрасным выходом казалось предложение генерал-лейтенанта артиллерии маркиза де Монламбера о строительстве форта нового типа. Выполненный целиком из дерева, он должен был успешно противостоять натиску противника благодаря установке на его стенах значительно большего числа орудий, чем обычно. Несмотря на возражения ряда инженеров, в том числе командующего Военно-инженерным корпусом генерала де Ламекура, правительство решило поставить эксперимент и построить небольшой форт на острове Экс в устье реки Шаранты, в восьми милях от Рошфора. Цель строительства — защита входа в реку и предотвращение осады Рошфора, в котором находилась одна из самых современных верфей Франции.

Кулон как военный инженер должен был принять участие в строительстве форта. Задача была крайне сложная — Монламбер обязался построить форт всего за один месяц и затратить на строительство всего 3% средств, которые обычно

¹ См.: Куломб Ш. О. Изыскания о способах произведения под водою всяческого рода гидравлических работ без остановки водного течения. — М., 1790.

² Англия объявила Франции войну в декабре 1780 г.

ИЗЫСКАНИЯ
О
СПОСОБАХ
ПРОИЗВОЖДЕНИЯ
ПОДЪ ВОДОЮ
ВСЯКАГО РОДА
ГИДРАВЛИЧЕСКИХЪ
РАБОТЪ
БЕЗЪ ОСТАНОВКИ
ВОДНАГО ТЕЧЕНИЯ.

ИЗДАНИЕ
Господиной Кулоновой, Капитановъ пер-
лаго риза, Кормисскаго Императорнаго
Корпуса, Корреспондентовъ Париж-
ской Академии Наукъ,
Перевелъ съ Французскаго
Александръ Соловьевъ.

МОСКВА.

Въ Университетской Типографіи,
у В. Окорока,
1790.

Рис. 10. Титульный лист
русского перевода рабо-
ты Кулона.

требовались на сооружения такого рода. Кроме того, само строительство было организовано весьма необычно. Деревянные элементы конструкции форта изготовлялись плотниками на верфи Рошфора, а затем транспортировались на остров Экс.

Строительство, помимо необычности проекта, затруднялось несколькими обстоятельствами. Во-первых, уже во время стройки Монламбер непрерывно вносил в конструкцию форта изменения. Во-вторых, при транспортировке готовых деталей они коробились и на месте значительное время уходило на их доводку. В-третьих, близость Рошфорских болот привела к массовым болезням среди плотников, так что для реализации проекта требовалась мобилизация дополнительных рабочих из Бордо, Тура и Нанта. Лично для Кулона работа осложнялась приказом Монламбера, согласно которому ему вменялось в обязанность трижды в неделю проделывать путь из Рошфора на Экс и обратно, причем день на острове, по словам Кулона, как правило, проходил впустую. Столь частые разъезды плохо отражались на здоровье Кулона.

Работа на строительстве форта, видимо, раздражала Кулона. Об этом, в частности, свидетельствуют его рапорты в Версаль. Не в привычках Кулона было осуществление проектов, которые он считал абсолютно ошибочными: точка зрения Кулона на проект Монламбера практически совпадала с позицией его начальника де Ламекура. Впоследствии, уже будучи членом Парижской академии наук, Кулон принимал косвенное участие в многолетних спорах между Монламбером и де Ламекуром: он всячески избегал выступать экспертом по работам, представлявшимся Монламбером, и охотно входил в состав комиссий, рассматривавших возражения де Ламекура.

В итоге строительство форта сильно затянулось. Вместо обещанного месяца оно продолжалось более полугода и поглотило значительно больше средств, чем первоначально предполагалось. С военной точки зрения сооружение было весьма уязвимо и не оправдало возлагавшихся на него надежд.

В конце 1779 г. или начале 1780 г. Кулон в связи с завершением строительства получил новое назначение — на север Франции, в Лилль. Однако перед отбытием к новому месту службы ему был предоставлен отпуск для поездки в Париж по все еще тянувшемуся делу о наследстве. Этой поездкой завершился важный для исследовательской деятельности Кулона период, связанный с Рошфором. Мы уже не раз убеждались в том, что, какими бы сложными ни были служебные обязанности Кулона, он находил время для проведения научных изысканий. Не стало исключением и его пребывание в Рошфоре. Здесь он выполнил цикл экспериментов, посвященных

внешнему трению, результаты которого были изложены в мемуаре под названием «Теория простых машин». Эта работа Кулона стала основополагающей в учении о трении, и о ней будет подробно рассказано в следующей главе.

В Лилле Кулон прослужил недолго — с весны 1780 г. до осени 1781 г., когда сбылась его заветная мечта и он был переведен в Париж. Однако и за это короткое время он успел выполнить специальное исследование, тема которого казалась весьма неожиданной — механика ветряных мельниц. Интерес к этой теме определялся особенностями места службы Кулона. На севере Франции, так же как и в соседних странах, ветряные мельницы были одним из наиболее распространенных механических устройств, и разработка их оптимальной конструкции была актуальной технической проблемой. Мемуар «Теоретические и экспериментальные соображения об эффективности ветряных мельниц и форме их крыльев» был представлен в Парижскую академию наук в 1781 г. и несколько позднее опубликован.

Таким образом, работой о ветряных мельницах завершился начальный этап научной деятельности Кулона. Переезд в столицу означал не только изменение места службы и круга обязанностей. Это событие привело к качественному изменению тематики научных исследований Кулона.

Глава V.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ

В физике найдется немного столь удивительных явлений, как внешнее (сухое) трение. Действительно, с этим видом трения человек познакомился очень давно. Строители древних государств Востока — Вавилона, Египта, Ассирии — пытались избавиться от вредного влияния трения¹ и делали первые попытки его использования. Можно без преувеличения сказать, что трение — одно из самых распространенных явлений, с которым человек сталкивался буквально на каждом шагу. В то же время и сейчас решены далеко не все вопросы, связанные с физической процессом, обусловленного трением. Известный советский ученый, внесший значительный вклад в изучение трения, академик Б. В. Дерягин писал, что «одна из важнейших причин такого положения кроется в объективных трудностях научного изучения явлений трения, коренящихся в его природе. Трудности связаны с тем, что хотя внешнее трение по

¹ В этой главе под термином «трение» мы будем понимать, если это не оговорено особо, внешнее (сухое) трение, которое обычно противопоставляют внутреннему (вязкому) трению.

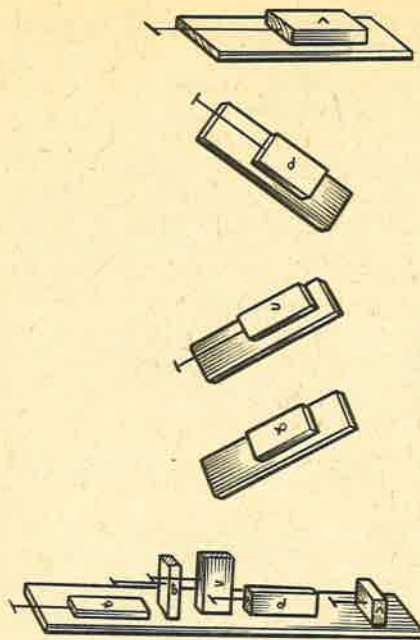


Рис. 11. Рисунки Леонардо да Винчи с изображением его опытов по трению.

очень много времени, прежде чем были разработаны методы измерения трения, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым любым научным измерениям: воспроизводимости результатов и возможности их использования на практике.

Одним из первых исследователей трения был Леонардо да Винчи. Он поставил опыты (рис. 11), в которых пытался измерить величину трения. На основе этих опытов он пришел к следующим выводам: «Способность тел к скольжению различна, поэтому трение имеет различную величину. Тела с более гладкой поверхностью имеют меньшее трение. Всякое трущееся тело оказывает при трении сопротивление, равное одной четверти своего веса, при условии соприкосновения ровной (горизонтальной.— С. Ф.) плоскости с полированной поверхностью». Таким образом, пользуясь современной терминологией, можно сказать, что Леонардо принимал коэффициент трения равным 0,25. Этот неточный, как мы теперь знаем, вывод был связан, с одной стороны, с тем, что Леонардо экспериментировал с ограниченным набором материалов, для которых коэффициент трения действительно близок к 0,25. С другой стороны, на первых этапах изучения трения практически все исследователи стремились установить некий «фун-

своему основному проявлению и действию — явление чисто механическое, которое крайне просто обнаруживать и измерять, но в основе его лежат особые молекулярные взаимодействия, сосредоточенные в тончайшем поверхностном слое твердых тел и сложным образом зависящие от состава и строения этого слоя».

Обратим внимание читателя на то, что Б. В. Дерягин подчеркивает: сухое трение на первый взгляд представляет собой чисто механическое явление. Вследствие этого в течение многих веков трение рассматривалось лишь в рамках механики. Заметим также, что современный специалист утверждает, что трение «крайне просто... измерять». С этим суждением, по-видимому, не согласились бы ученые древности. Прошло

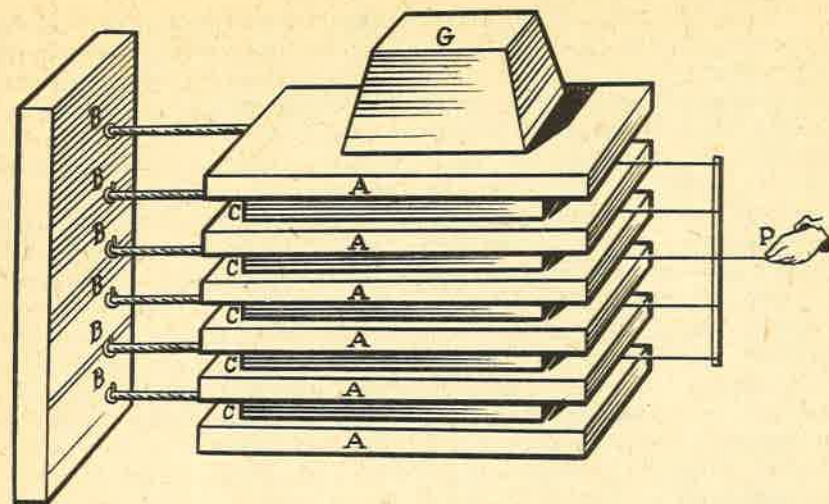


Рис. 12. Схема опыта Амонтона по изучению зависимости силы трения от площади соприкосновения тел.

даментальный» закон и в этом стремлении часто заходили очень далеко.

В записных книжках Леонардо да Винчи сохранились его наблюдения над трением, касающиеся влияния промежуточной прослойки на его величину. Он исследовал и проблему, занимавшую многих ученых последующих веков, а именно зависит ли сила трения от площади соприкосновения поверхностей. Однако наблюдения Леонардо не были опубликованы и поэтому не оказали влияния на развитие науки о трении.

Важнейшим этапом в становлении научных представлений о трении стали исследования французского физика, члена Парижской академии наук Гильома Амонтона (1663—1705). Работая над созданием теплового двигателя, который получил название «огневой мельницы», Амонтон поставил ряд опытов по трению (рис. 12). В работе «О сопротивлении, порождаемом в машинах» (1699 г.), созданной по результатам этих опытов, он писал: «Ошибочно предполагать, как это думают обычно, что трение двух соприкасающихся тел возрастает с увеличением площади касания... На опыте трение возрастает только с увеличением нагрузки». Так, в историю науки вошел закон трения, носящий имя Амонтона:

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где $F_{\text{тр}}$ — сила трения, N — сила нормального давления, μ — коэффициент трения. Надо сказать, что вывод Амонтона о независимости силы трения от площади соприкосновения

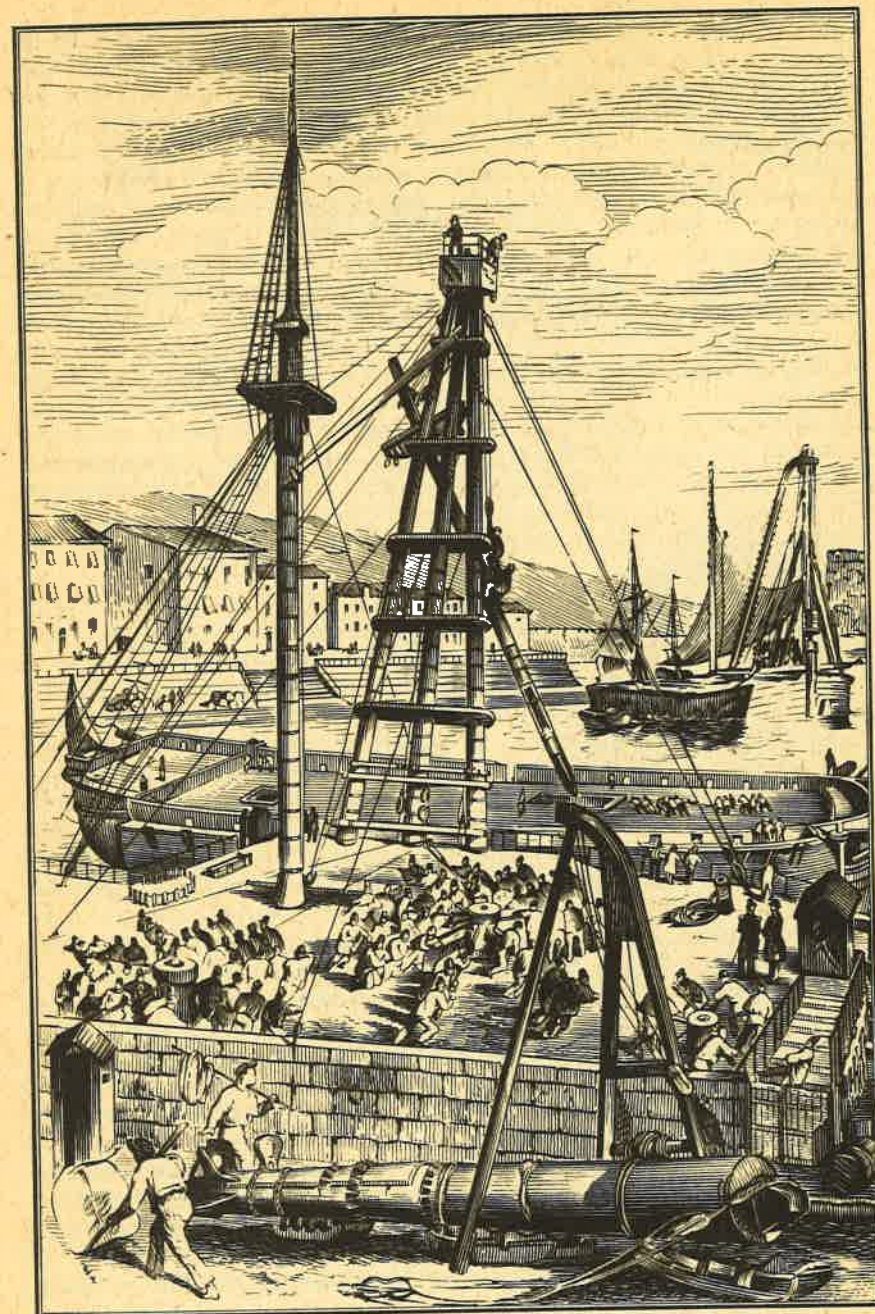
тел¹ был с недоверием воспринят современниками. Французский ученый Делагир в 1699—1700 гг. провел серию проверочных экспериментов, которые в целом подтвердили это заключение. Делагир предложил объяснение эффекта. Оно основывалось на предположении о том, что на поверхности тел существуют неровности двух видов: одни — упругие, другие — жесткие и твердые. Эти неровности при контакте тел приходят в зацепление, и для того, чтобы сдвинуть тела друг относительно друга, необходимо преодолеть некоторое сопротивление — это и есть сила трения. Особенности механизма возникновения сопротивления (изгиб упругих неровностей и подъем одной поверхности над другой при преодолении жесткой неровности), по Делагиру, таковы, что независимо от характера неровностей результирующая сила трения пропорциональна силе, сжимающей тела. Механическая гипотеза Делагира о происхождении трения прожила в науке очень долго. Однако с ее помощью удалось объяснить далеко не все закономерности трения.

В дальнейшем, на протяжении всего XVIII в., ставились опыты по изучению трения. Основной вклад здесь внесли французы Паран и Камю, немец Леупольд, голландец Мушенбрек. Интересные работы о трении были написаны русскими академиками М. В. Ломоносовым и С. К. Котельниковым. В середине столетия английский ученый Ж. Т. Дезагюлье выдвинул идею о молекулярном механизме возникновения трения, однако эта гипотеза не была развита его современниками. В XVIII в. были решены некоторые важные математические задачи, касающиеся трения. В частности, великий математик Л. Эйлер создал теорию трения гибких нитей, причем ему удалось получить формулу, описывающую трение гибкой нити о круглый цилиндр, которая и в наше время с успехом применяется на практике.

Однако, несмотря на общее увеличение числа теоретических и экспериментальных работ по трению, ясность в вопросах, касающихся этого сложного явления, отсутствовала. В экспериментальных результатах некоторых авторов имелись разногласия. Это касалось зависимости силы трения от площади соприкосновения тел, скорости их относительного движения и т. д. В ряде случаев эксперименты, проведенные в лаборатории, казались противоречащими повседневному опыту. Все это, конечно, затрудняло использование результатов научного исследования трения в инженерной практике.

Парижская академия наук, как уже говорилось, уделяла

¹ В настоящее время установлено, что сила трения пропорциональна фактической площади касания поверхностей, которая зависит от силы, сжимающей эти поверхности, и их механических свойств; фактическая площадь касания слабо зависит от номинальной (т. е. определяемой размерами тел) площади.



Старинная гравюра с изображением верфи, на которой при строительстве корабля используются простые машины; в центре гравюры группа рабочих поднимает мачту с помощью кабестана.

значительное внимание научным проблемам, имевшим большое значение для практики; именно таким проблемам чаще всего посвящались академические конкурсы. Поэтому не удивительно, что в 1777 г. академия объявила конкурс на 1779 г., посвященный решению «проблемы трения скользящих и катящихся поверхностей, сопротивления изгибанию канатов и применению этих решений к простым механизмам, используемым в военном флоте». Упоминание о военно-морском флоте в формулировке задачи конкурса было связано с тем, что французские власти были крайне озабочены отставанием своего военного флота от английского. Обилие теорий трения и уже отмечавшийся разницей в экспериментальных данных заставили академию еще более конкретизировать задачу. Было указано, что в представляемых на конкурс работах должны исследоваться «эффекты, обусловленные жесткостью канатов, которые должны быть изучены на основе новых полномасштабных экспериментов; требуется также, чтобы эти эксперименты могли применяться к механизмам, используемым в военно-морском флоте, таким, как блок, кабестан¹ и наклонная плоскость».

Из работ, поданных на конкурс в 1779 г., ни одна не была удостоена премии, поэтому было решено вновь объявить эту тему как конкурсную на 1781 г.

Кулон решил принять участие в повторном конкурсе, к нему, с одной стороны, располагали условия его службы в Рошфоре, где находилась одна из самых современных по тому времени верфей Франции. На ней благодаря доброжелательному отношению коменданта порта ученый мог ставить полномасштабные эксперименты; кроме того, в распоряжение Кулона были выделены два человека, помогавшие ему в подготовке и проведении опытов. С другой стороны, Кулон понимал, что вторая победа на академическом конкурсе делает его избрание в состав академии вполне вероятным. Немаловажным было и то обстоятельство, что уже в своем первом мемуаре, посвященном строительной механике, Кулон касался проблем трения и отмечал недостатки имевшихся экспериментальных данных; следовательно, конкурсная тема не была для него совершенно новой.

В 1780 г. Кулон представил в академию конкурсную работу «Теория простых машин»; в следующем году она была удостоена премии. В этой работе Кулон удовлетворил практически всем требованиям, выдвинутым академией. Его теоретические построения основывались на результатах полномасштабных систематических опытов.

Для экспериментов Кулон использовал простую, но хорошо

¹ Кабестан — лебедка с барабаном, насаженным на вертикальный вал; используется для подтягивания судов к причалу, выбирания якорей и т. д.

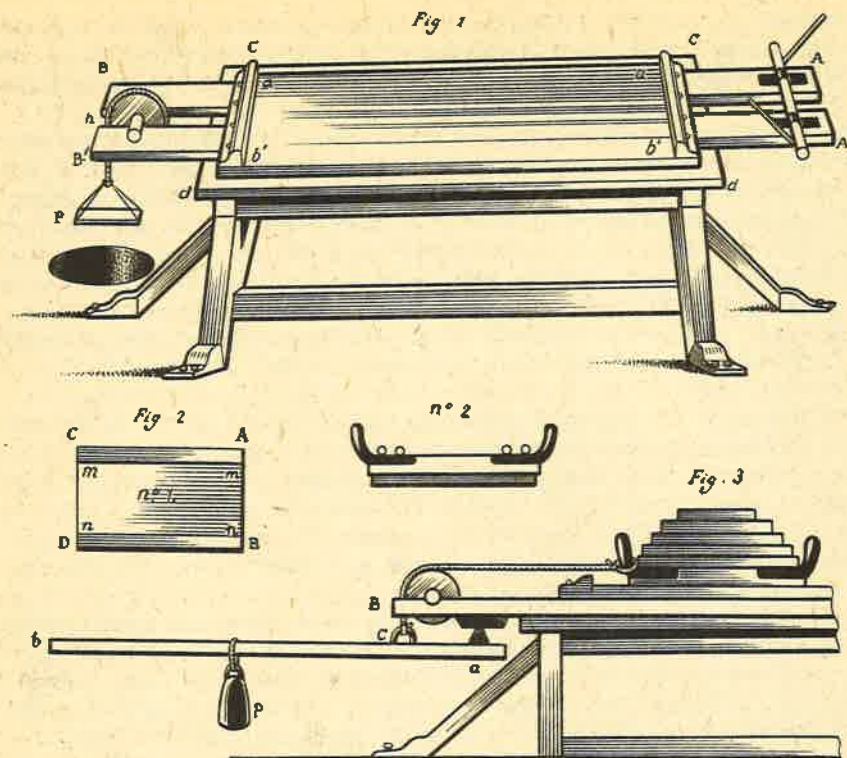


Рис. 13. Схема экспериментальной установки Кулона для изучения трения.
Fig. 1 — общий вид установки;
Fig. 2 — устройство салазок, где n° 2 — сами салазки;
Fig. 3 — установка для определения силы трения покоя.

продуманную установку. Ее схема показана на рисунке 13.1. Главной частью прибора является большой прочный стол (столешница имела длину 2430 мм, ширину 610 мм и толщину 75 мм). На столе помещались две дубовые доски AB и $A'B'$ на некотором расстоянии одна от другой. На противоположных концах этих досок были установлены вспомогательные устройства: слева (B и B') — блок h , насаженный на ось, через который мог перекидываться трос, справа (A и A') — специальный деревянный вал.

При проведении опытов по трению покоя на досках закреплялся дубовый щит $aab'b'$ ($2430 \times 406 \times 75$ мм), который предварительно тщательно обрабатывался рубанком, а затем полировался кожей акулы. По щиту с помощью устройства, показанного на рисунке 13.3, заставляли скользить салазки (см. рис. 13.2 и n° 2) с нагрузкой, которую можно было менять. К крюкам салазок крепились веревки, одну из которых при-

вязывали к петле c , укрепленной на доске-рычаге с перемещающимся грузом P , вторую — к валу, размещенному на концах досок AA' ; посредством вала салазки устанавливались в исходное положение.

Трение скольжения изучали с помощью той же установки, только к веревке, перекинутой через блок h , крепили платформу P (см. рис. 13, Fig. 1), на которую помещали грузы разного веса. Платформа P могла опускаться на расстояние до 2,5 м. Процедура измерений состояла в следующем. Салазки устанавливали на неподвижную доску, на них клали груз заданной массы, а на платформу — три груза, создававшие движущее усилие. Отсчеты времени и пройденного пути проводили по очень простой схеме, о которой Кулон писал:

«Боковую часть доски мы разделили на дюймы и измеряли пройденное расстояние при помощи часов, отбивающих секунды; рабочие, которых я использовал, были распределены так: один отсчитывал время (колебания маятника), другой криком извещал о прохождении салазок через каждое деление, тогда как я сам записывал и сопоставлял эти два измерения».

Приходится лишь удивляться, как при помощи столь примитивных средств Кулону удалось получить удивительно точные результаты, сохранившие свое значение практически до наших дней. Кулон провел цикл опытов, в которых изучил важнейшие особенности явления трения. Прежде всего он исследовал зависимость силы трения покоя от продолжительности контакта тел. Им было установлено, что у одноименных тел (дерево — дерево, металл — металл) продолжительность контакта сказывается незначительно. При контакте разноименных тел (дерево — металл) коэффициент трения покоя возрастает в течение нескольких суток. Кулон также отметил так называемое явление застоя: сила, необходимая для перевода тел, находящихся в контакте, из состояния покоя в состояние относительного движения, значительно превосходит силу трения скольжения.

Кулон тщательно изучил также проблему, которую, как мы помним, ученые обсуждали со времен Леонардо да Винчи: зависит ли коэффициент трения скольжения от площади касания при постоянной силе нормального давления? Он обнаружил, что такая зависимость существует: коэффициент трения понижается с уменьшением площади касания. Однако эта зависимость очень слабая. Например, уменьшению коэффициента трения в 2 раза соответствует уменьшение площади более чем в 200 раз. Столь незначительное изменение коэффициента трения позволило Кулону сделать справедливый в первом приближении вывод о независимости коэффициента трения от площади контакта.

При исследовании зависимости силы трения скольжения Кулон обнаружил уменьшение этой силы с ростом скорости относительного движения взаимодействующих поверхностей.

Интересно, что все важнейшие закономерности трения, обнаруженные Кулоном, были впоследствии подтверждены учеными, в распоряжении которых находились гораздо более совершенные экспериментальные средства. Следует также отметить, что своими систематическими опытами ученый показал, что явление трения чрезвычайно сложно и его невозможно описать какими-то универсальными соотношениями. Поэтому и выводы из проведенных опытов Кулон сформулировал, не претендуя на общность. Они звучат так:

«1. При скольжении дерева по дереву без смазки после достаточно большой продолжительности соприкосновения возникает сила трения, прямо пропорциональная нормальному давлению; эта сила возрастает лишь в первые мгновения соприкосновения, через несколько минут она достигает максимума.

2. При скольжении дерева по дереву без смазки с некоторой скоростью сила трения также пропорциональна нормальному давлению, но по величине она много меньше той, которая требуется, чтобы нарушить связь между поверхностями после некоторого времени контакта. Установлено, например, что сила, необходимая для нарушения связи двух поверхностей дуба, после нескольких минут контакта относится к силе, необходимой для того, чтобы преодолеть трение, когда поверхности движутся с некоторой скоростью, как 35 : 22.

3. При скольжении металла по металлу без смазки сила трения пропорциональна давлению, но ее значение одинаково, независимо от того, хотят ли нарушить связь между поверхностями после некоторой продолжительности контакта или хотят поддержать некоторую постоянную скорость.

4. При скольжении разнородных поверхностей, например дерева по металлу без смазки, результаты чрезвычайно сильно отличаются от предыдущих, так как интенсивность их трения, зависящая от продолжительности контакта, возрастает медленно и достигает своего предела через 4—5 дней, а иногда и более, тогда как у металлов она устанавливается в одно мгновение, а у дерева в несколько минут; это возрастание происходит так медленно, что сопротивление трения при очень малых скоростях почти такое же, как при нарушении связи путем сотрясения или отрыва после 3 или 4 секунд продолжительности контакта. Кроме того, у дерева, скользящего без смазки по дереву, и у металлов, скользящих по металлам, скорость почти не влияет на трение, но в этом случае трение возрастает по мере того, как увеличивается скорость; в то время как скорость возрастает в геометрической прогрессии,

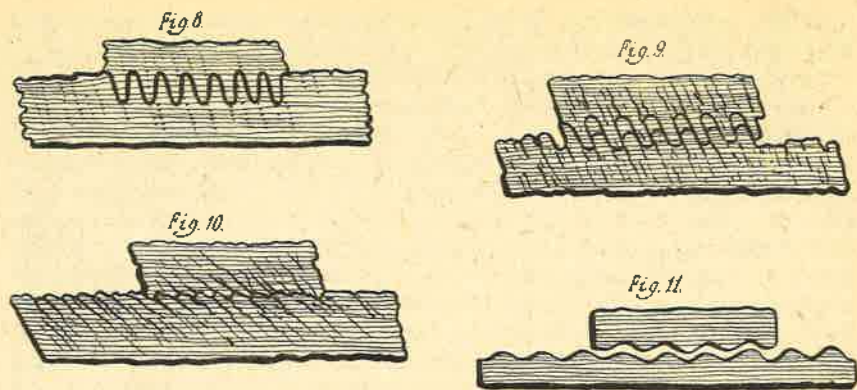


Рис. 14. Модель трения по Кулону (рисунки из его работы).

трение возрастает в арифметической прогрессии».

Однако Кулона нельзя назвать чистым эмпириком, не проявляющим интереса к построению теории тех явлений, которые он исследует. На основе результатов экспериментов он попытался нарисовать общую картину процессов, возникающих при трении. Конечно, Кулону не были известны ни детали молекулярного строения тел, ни микроструктура их поверхностей и он был вынужден ограничиться чисто механической картиной явления. В работе Кулона механическая теория трения фактически получила свое завершение. Позднейшие исследователи, не затронув ее принципиальных положений, лишь уточнили некоторые математические формулировки. Общий подход Кулона к рассмотрению трения хорошо иллюстрирует следующий пространственный отрывок из его работы:

«Для наглядности представим себе (рис. 14.8), что волокна, покрывающие поверхность древесины, входят друг в друга, как ворс двух щеток.

Чтобы определить усилие, необходимое для скольжения одной щетки по другой, надо изучить различные положения ворса в момент, когда прилагают усилие, чтобы разъединить щетки, или в том случае, когда они скользят друг по другу.

Мы предполагаем, что, когда кладут хорошо отполированную поверхность одну на другую, волокна, торчащие на поверхности, входят в друга, как это изображено на рисунке 14.8. Если хотят заставить скользить верхнюю планку по нижней, волокна обеих поверхностей будут сгибаться до тех пор, пока происходит их касание без выхода из зацепления (рис. 14.9). Заняв данное положение, волокна, взаимно касаясь, не могут согнуться больше, угол их наклона зависит от размера ворса и будет одним и тем же при всех давлениях; таким образом, при всех значениях давления будет нужна

сила, пропорциональная давлению, чтобы волокна, скользя и сохраняя этот наклон, могли бы разъединиться». И далее:

«Металлы состоят не из волокон, не из гибких частей; расположение углублений на поверхности и строение металла не изменятся ни при каких обстоятельствах, вследствие этого значение трения одно и то же, независимо от того, находятся салазки в покое или в движении, ибо оно (трение) зависит от строения мельчайших частиц, составляющих поверхности, и наклона касательных плоскостей в точках соприкосновения. На рисунке 14.11 изображены два металла, лежащие друг на друге.

Когда дерево скользит по металлу, эластичные волокна дерева проникают в углубления; поскольку эти волокна гибки и эластичны, они погружаются в углубление лишь постепенно, следовательно, сопротивление трения возрастает по мере того, как увеличивается продолжительность неподвижного контакта. При движении салазок ворс на поверхности дерева, встречая неровности металла, сгибается, чтобы преодолеть вершины этих неровностей».

Кулон, по-видимому, считал свою теорию универсальной, поскольку тогда не было известно фактов, которые противоречили бы ей. Однако он допускал, что в будущем такие факты могут появиться.

Итак, что нового внес Кулон своей работой 1781 г. в науку о трении? Прежде всего он на большом экспериментальном материале, с одной стороны, подтвердил закон Амонтона, утверждавший пропорциональность силы трения силе нормального давления, а с другой — показал его ограниченный характер. Им тщательно изучено явление застоя при внешнем трении. Своими опытами Кулон заложил основы изучения зависимости силы трения скольжения от относительной скорости соприкасающихся тел. Особое значение работы Кулона для практики состоит в том, что он при проведении экспериментов не ограничивался небольшими нагрузками, характерными для опытов, ставившихся в *cabinet de physique*, а использовал большие нагрузки, близкие к тем, что встречаются в реальной жизни: их масса доходила до 1000 кг! Эта особенность исследований Кулона обусловила долгую жизнь его результатов — данные измерений, содержащиеся в мемуаре «Теория простых машин», использовались инженерами на протяжении почти целого столетия.

В области теории заслуга Кулона состоит в создании достаточно полной механической картины трения. В современных исследованиях по внешнему трению сохранила свое значение и идея Кулона о двойственной природе трения. Он считал, что полную силу трения $F_{тр}$ можно представить в виде двух слагаемых, первое из которых (A) не зависит от силы нормального давления N и определяется сцеплением поверх-

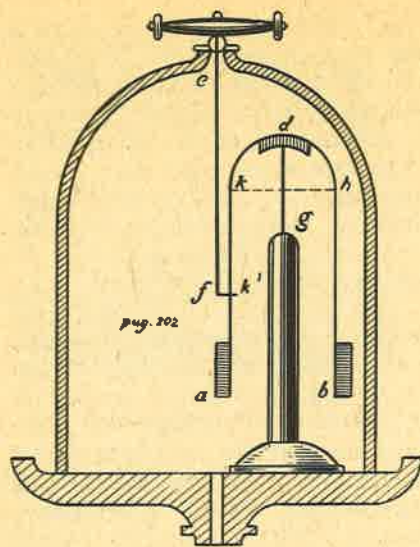


Рис. 15. Схема установки Кулона для изучения трения верчения.

тики. Как мы помним, первый успех Кулона на академическом конкурсе был связан с усовершенствованием компаса. В работе 1777 г. Кулон предложил подвешивать стрелку компаса на тонкой нити. Однако такая конструкция была пригодна только для стационарных условий. Для навигации, при проведении картографических работ на местности нужны были высококачественные компасы, стрелки которых опирались бы на острие. Важнейшей проблемой, с которой сталкивались ученые при попытках усовершенствования компаса этой конструкции, была проблема трения в подпятнике — трения верчения. Для уменьшения трения в компасах применяли конические подпятники, сделанные из полудрагоценного камня агата. До работ Кулона отсутствовала ясность в вопросе о том, каковы оптимальные характеристики компаса (нагрузка на острие, угол заточки острия и т. д.). С присущим ему мастерством Кулон изучил эту проблему с помощью установки, показанной на рисунке 15. Под колпаком, предохранявшим систему от внешних воздействий¹, находилась латунная вилка, которая на рисунке 15 обозначена как kdh , с грузами a и b . Она крепилась на острие, которое в свою очередь опиралось на подпятник g . С помощью наружной ручки путем поворота захвата efk' вилка и острие приводились во вращение, постепенно замед-

ностей, а второе прямо пропорционально N :

$$F_{тр} = A + \mu N,$$

где μ — коэффициент трения.

Таковы в общих чертах результаты, изложенные в конкурсном мемуаре Кулона.

Однако победа на конкурсе академии не привела к уменьшению интереса Кулона к проблеме трения. К исследованиям на эту тему он вернулся через десять лет. В 1790 г. он представил в академию мемуар «О трении в острие опоры». В нем ученый исследовал трение, возникающее при верчении и катании. Возвращение к проблеме трения было обусловлено опять-таки запросами практи-

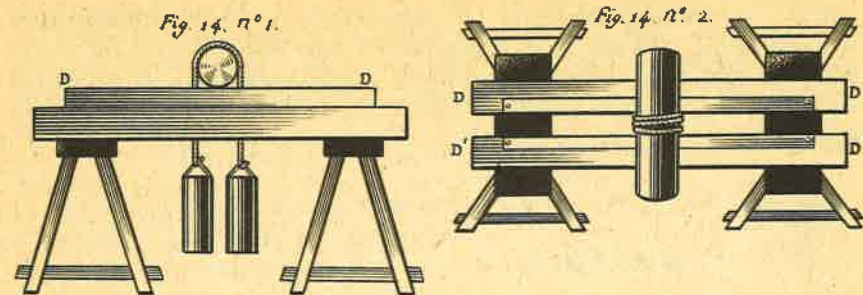


Рис. 16. Установка Кулона для исследования сопротивления перекатывания (n° 1 — вид сбоку, n° 2 — вид сверху).

лявшейся вследствие трения в подпятнике. Определяя скорость этого замедления, можно было найти характеристики трения верчения. При изучении данного вопроса в отличие от работы по сухому трению Кулону не удалось установить какие-либо общие закономерности. Тем не менее его выводы имели важное практическое значение. Они состояли в следующем:

«1. Трение острия не зависит от скорости и является функцией давления.

2. Трение граната меньше трения агата, а трение агата меньше трения стекла. Однако силы трения стекла более равномерно распределены по площади контакта.

3. Очертание острия очень сильно влияет на трение. При нагрузках 5—6 гран наиболее благоприятен угол острия в пределах 30—45°. При уменьшении нагрузки можно постепенно уменьшать этот угол без опасения увеличить трение; более того, для острия из хорошей стали при нагрузке, не превышающей 100 гран, этот угол можно даже уменьшить до 10—12°.

4. Все подпятники даже лучших мастеров недостаточно однородны. Трение в них обычно в 5—6 раз превышает трение по плоскости. Поэтому желательно угол конусности делать возможно меньше».

Кроме трения скольжения и верчения, Кулон изучал и трение перекатывания. В его опытах использовалась установка, схема которой показана на рисунке 16. Она состояла из двух параллельных горизонтальных балок из дуба, укрепленных на прочных стойках. По этим балкам мог перекатываться валик, на который был намотан канат с разными грузами на концах. Опыты с катками разных радиусов, а также изготовленными из разных сортов дерева показали, что сопротивление перекатывания F пропорционально нагрузке N и обратно пропорционально радиусу катка r :

$$F = \lambda \frac{N}{r},$$

¹ Заметим, что для уменьшения воздействия воздуха на движение стрелки Кулон откачивал воздух из-под внешнего колпака.

где λ — соответствующий коэффициент трения, имеющий размерность длины. Для техники конца XVIII в., в которой бревна круглого сечения широко использовались в качестве катков, результаты, полученные Кулоном, имели большое значение.

Глава VI.

В ПАРИЖ

Перевод в Париж был долгожданным событием в жизни Кулона. Несмотря на то что практически во всех местах, где он служил, ему удавалось найти дело по душе, служба в столице все же имела множество ни с чем не сравнимых преимуществ. На них указал сам Кулон в докладной записке на имя военного министра, подготовленной им в июле 1781 г. Прежде всего, отмечал Кулон, служба в Париже обеспечит ему значительно лучшие условия для работы: в столице он будет иметь доступ к нужной ему литературе, получит возможность консультироваться у специалистов по различным техническим вопросам и т. д. Этот момент представлялся Кулону особенно важным, поскольку он задумал подготовку фундаментального труда по инженерии, который вобрал бы в себя основные достижения науки и техники и заменил бы устаревшие труды Белидора, служившие в то время основными справочными и учебными пособиями для военных и гражданских инженеров.

Пребывание в Париже, по словам Кулона, позволило бы ему более тщательно и систематично проводить эксперименты. Частые разъезды, неизбежные при службе в провинции, заставляли прерывать, а иногда и прекращать начатые опыты, которые Кулон ставил на собственные средства. Волновала Кулона и судьба его научных мемуаров. Он писал, что издание их в Париже без должного авторского надзора приводит к тому, что его труды выходят с ошибками и «их невозможно читать».

В докладной записке министру Кулон откровенно признавался, что с переводом в столицу он связывал определенные честолюбивые надежды. Выборы в Парижскую академию наук в декабре 1780 г. показали, что его шансы быть избранным на следующих выборах очень велики. Кроме того, весной 1781 г. он стал победителем второго подряд академического конкурса, что, конечно, еще более укрепило его позиции. Но для того чтобы стать членом академии, необходимо было иметь возможность по крайней мере пять месяцев в году жить в Париже! Однако Кулон в своей аргументации не

ограничивался личными мотивами. Он подчеркивал, что Военно-инженерный корпус получит большие выгоды, если один из его офицеров станет членом академии, где проводятся исследования и делаются открытия, часто связанные с деятельностью корпуса.

Таким образом, записка Кулона выглядела весьма убедительно.

Одновременно с прошением о переводе Кулон возбудил ходатайство о награждении его (тогда это было принято) Крестом Св. Людовика. Этой наградой по положению отмечались офицеры, прослужившие в армии определенный срок. Для капитана, в чине которого пребывал в то время Кулон, этот срок составлял 25 лет, причем год службы в колониях считался за два года службы в метрополии. По расчетам Кулона в середине 1781 г. его выслуга с момента поступления в Мезьерскую школу составляла тридцать лет и он имел все основания быть отмеченным этой воинской наградой.

Кулон, как мы знаем, был на хорошем счету у начальства, и, кроме того, оба его ходатайства поддержал Понтлеруа, военный инженер, под началом которого Кулон служил в Лилле. Поэтому положительное решение обоих вопросов не заставило себя долго ждать. В первой половине сентября 1781 г. военный министр объявил о переводе Кулона в Париж, где он должен был заниматься инженерными вопросами, связанными с печально известной крепостью-тюрьмой Бастилией. 30 сентября того же года он был награжден Крестом Св. Людовика. Сообщение об этом событии застало Кулона уже в Париже. Оправдались и его надежды, связанные с Парижской академией наук. 12 декабря 1781 г. он был избран в академию по классу механики.

Так, в течение полугода круто изменилось положение Кулона. Из рядового инженера он превратился в консультанта по различным инженерно-техническим вопросам и из подающего надежды исследователя — в члена высшего научного учреждения Франции. Эти изменения, естественно, не могли не сказаться на характере его деятельности. Чем же занимался Кулон в Париже в период с 1781 г. до начала Великой французской революции? Конечно, наибольший интерес для него представляла исследовательская деятельность и работа в Академии наук. Однако у Кулона было довольно много обязанностей, непосредственно не связанных с наукой. Его работа в Бастилии, правда, не отмечена особенно яркими событиями. Тем не менее нельзя сказать, что служба Кулона в качестве капитана Военно-инженерного корпуса протекала очень спокойно. Одним из наиболее ярких эпизодов, касающихся этой стороны деятельности Кулона в 80-е годы, стала история с проектом строительства системы каналов в Бретани.

О слабости французского флота в сравнении с флотом

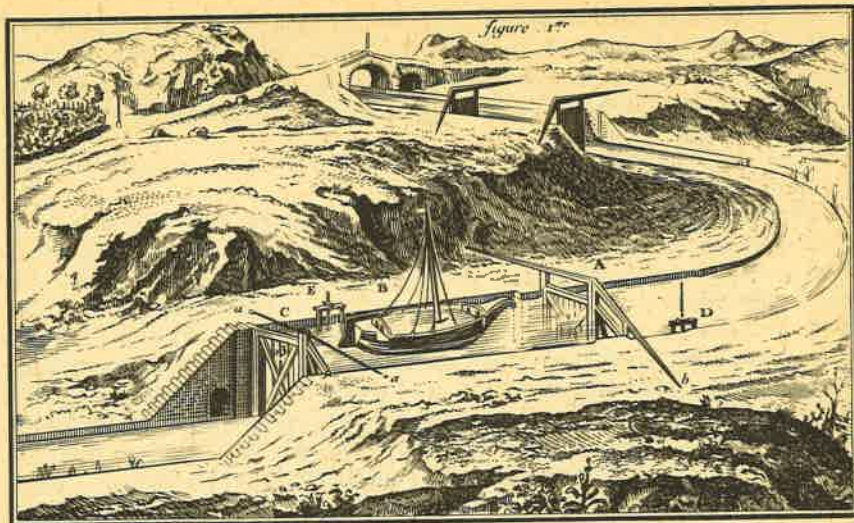


Иллюстрация принципа построения канала и шлюзов из «Энциклопедии» Дидро и Даламбера.

Англии уже говорилось в связи со службой Кулона в колониях. Однако флот соседней Англии постоянно угрожал не только колониям, но и побережью самой метрополии. Поскольку значительная часть снабжения страны и внутреннего товарообмена шла через порты западного (атлантического) побережья Франции, то в случае войны и блокады портов страна могла оказаться в весьма затруднительном положении. В связи с этим в начале 80-х гг. XVIII в. в Бретани, провинции, в наибольшей степени зависевшей от снабжения морем, родилась идея строительства разветвленной системы каналов, которая связала бы крупнейшие города этой части Франции: Нант, Ренн, Лаваль, Анже и Сен-Мало. В январе 1783 г. Бретонские провинциальные Штаты (местный парламент) создали комиссию по каналам, которую возглавил граф де Пире, один из инициаторов всего проекта. Де Пире обратился к военному министру с просьбой выделить из состава Военно-инженерного корпуса опытного и знающего офицера в качестве консультанта комиссии. Министр назначил консультантом Кулона.

В мае 1783 г. Кулон вместе с еще одним членом Парижской академии наук, уроженцем Бретани аббатом Рошоном, выразившим желание помочь своим землякам, отправился в Ренн, где заседали Бретонские Штаты. В Ренне к Кулону и Рошону присоединились еще двое консультантов, представлявших гражданское ведомство мостов и дорог, инженер Лиар и генеральный инспектор мостов и дорог Шези.

В течение июня и части июля группа консультантов тщательно обследовала местность, где предполагалось строительство системы каналов. В результате они дали заключение о необходимой глубине каналов и длине шлюзов, а также оценку затрат, необходимых для реализации проекта. По мнению Шези, стоимость проекта должна была составить 615 000 ливров; несколько позднее он увеличил свою оценку до 861 000 ливров. В целом и Кулон, и гражданские инженеры, и представитель академии Рошон примерно одинаково, с одобрением, отозвались о проекте, однако отметили целый ряд инженерных проблем, которые могли возникнуть при его реализации.

Уже в июле некоторые члены консультативной группы вернулись в Париж. Кулон и Рошон задержались дольше, выполняя дополнительные изыскания. Между тем граф де Пире обратился с письмом к военно-морскому министру маршалу де Кастри и попросил рассмотреть еще один проект, связанный с безопасностью западного побережья Франции, — проект строительства двух больших портов (военного и торгового) близ Сен-Мало. Де Кастри направил Кулону и Рошону, находившимся еще в Ренне, письмо с просьбой прибыть в Сен-Мало к 10 сентября для обсуждения проекта де Пире, в котором должны были принять участие инженер Бавр и коллега Кулона и Рошона по Парижской академии Борда.

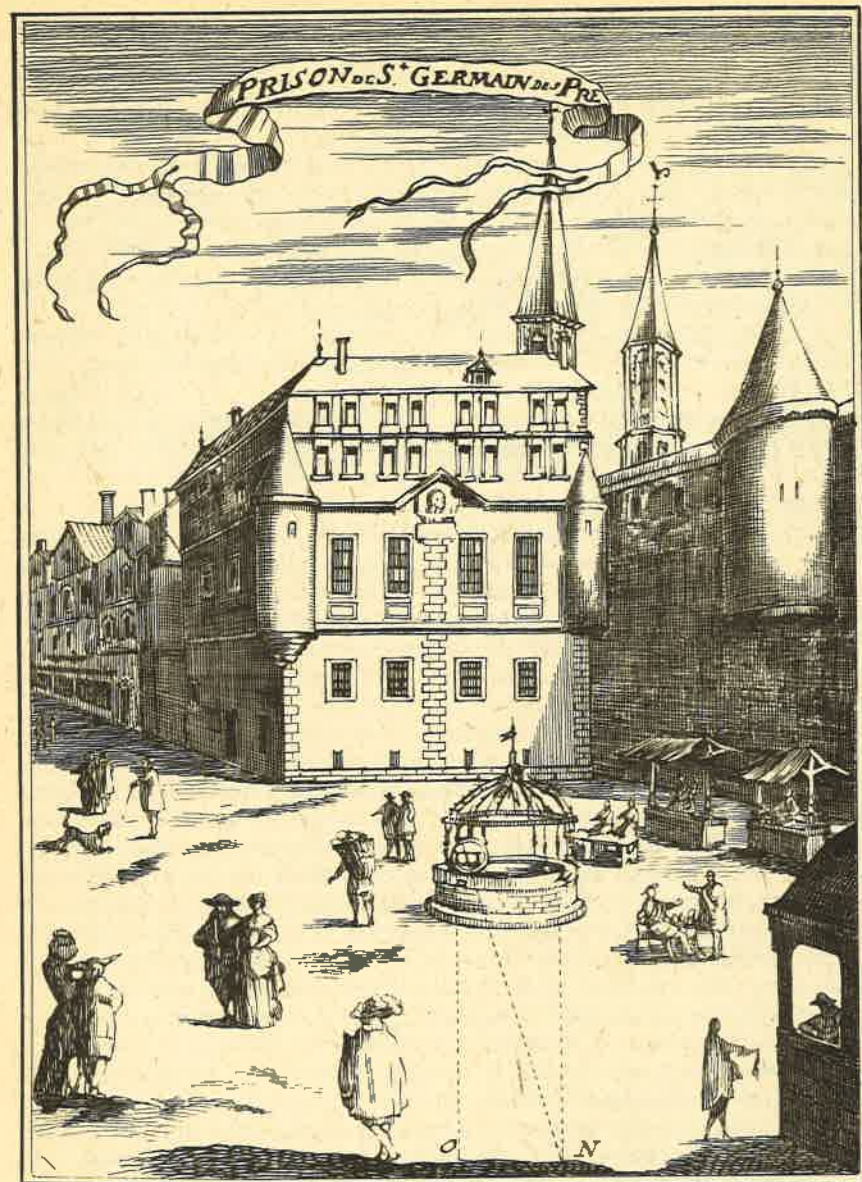
Хотя Кулон формально не подчинялся де Кастри, он решил отправиться в Сен-Мало, тем более что его миссия в Ренне подходила к концу. Перед отъездом он, однако, совершил еще один вояж по окрестностям Ренна, на этот раз верхом, во время которого уточнил некоторые вопросы, связанные с системой каналов. В конце августа он отправил военному министру письмо, в котором просил разрешения вернуться в Париж, поскольку в Ренне у него уже не осталось дел, а в столице его ждала работа в академии. В своем письме Кулон по неясной причине не упомянул о просьбе де Кастри, за что жестоко поплатился.

9 сентября комиссия по каналам устроила в Ренне обед в честь Кулона и Рошона, на котором их деятельность в качестве консультантов была оценена очень высоко. При этом, по словам Кулона, лишь в одном тосте прозвучало сожаление о том, что консультанты покидают Ренн. На торжественном обеде это воспринималось как естественная форма вежливости.

10 сентября Кулон был уже в Сен-Мало и спустя несколько дней вместе с прибывшими из Парижа коллегами приступил к осмотру бухты Сен-Мало и окрестностей. План де Пире основывался на том, что эта бухта могла бы служить надежным убежищем для кораблей французского флота в случае войны. Он обосновал свое предложение ссылкой на исторический факт: в 1692 г. группа из 21 корабля спаслась в бухте Сен-

Мало от превосходящего по силе английского флота. Осмотр бухты, однако, показал, что повторение этого эпизода в конце XVIII в. невозможно, поскольку увеличение водоизмещения и осадки военных кораблей ограничивает возможность их проводки в бухту Сен-Мало. За время, соответствующее одному приливу, в бухту могут либо войти, либо выйти из нее не более шести больших кораблей. На этом основании консультанты пришли к такому выводу: «Этот факт без сомнения доказывает, что Сен-Мало может служить убежищем лишь для небольшого числа кораблей, подвергающихся атаке либо плохой погоды, либо превосходящих сил противника... Однако если рассмотреть вопрос о том, какое значение это (строительство порта.— С. Ф.) будет иметь для военных операций в Проливе во время войны, то можно убедиться, что его преимущества ни в коей мере не соответствуют размерам сооружений, предложенных для него». Действительно, стоимость проекта превосходила все разумные пределы — 30 млн. ливров, из которых только на дноуглубительные работы предназначалось 13,5 млн. Можно с большой долей вероятности заподозрить автора проекта де Пире и тех, кто его поддерживал, в желании заполучить большой государственный подряд, с тем чтобы использовать его в целях наживы. В королевской Франции в канун Великой французской революции финансовые махинации приняла грандиозные размеры. Однако в данном случае преступным планам не суждено было осуществиться. Комиссия, отрицательно отзывавшись о плане строительства большого военного порта в Сен-Мало, указала, что если и следовало укрепить побережье, то не в Сен-Мало, а в районе Шербурра. Именно это принципиальное мнение квалифицированных инженеров вызвало гневную реакцию де Пире и Бретонских Штатов, крайне заинтересованных в выделении огромных сумм для реализации проекта. Выяснилось, что от комиссии ожидали не инженерных оценок, а лишь политического одобрения авантюрных планов. Вследствие интриг Кулон оказался втянутым в неприятную историю.

Дело в том, что, пока Кулон был в Сен-Мало, в Ренн из Парижа на его имя пришло письмо, в котором ему предписывалось оставаться в Бретани. Не получив этого письма, Кулон вернулся в Париж. Там начальство, возбужденное жалобами комиссии де Пире, обвинило Кулона в нарушении военного приказа. Это обвинение глубоко уязвило Кулона, человека очень добросовестного и исполнительного. Он написал военному министру письмо с объяснением обстоятельств дела, в котором также просил отставки, мотивируя свою просьбу плохим состоянием здоровья. Министр не ожидал такого поворота событий и был вынужден собрать специальную комиссию для обсуждения вопроса об отставке Кулона. Большинство членов комиссии выступили в его защиту, отмечая, что от-



Тюрьма аббатства Сен-Жермен де Пре, в которой отбывал наказание Кулон (старинная гравюра).

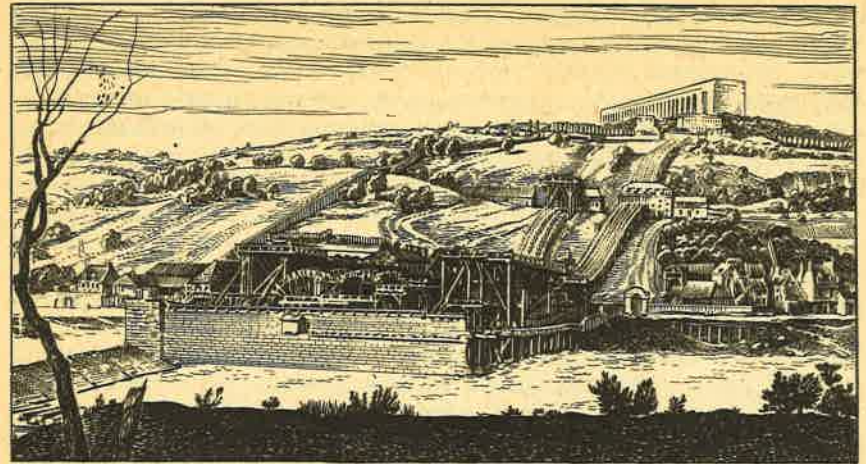
ставка Кулона «была бы серьезной ошибкой», поскольку «означала бы большую потерю для армии короля». В итоге министр отказал Кулону в отставке, но приговорил его к недельному аресту с пребыванием в Сен-Жерменском аббатстве. Кулон отбыл указанный срок наказания в ноябре 1783 г. О поведении комиссии по каналам в связи с этой историей Кулон писал, что она вела себя как «пациент, который хочет, чтобы врач был рядом с ним не потому, что тот может найти средство для его излечения, а для того, чтобы в случае ухудшения состояния он (больной. — С. Ф.) и окружающая публика имели бы возможность порицать врача».

Однако авторитет Кулона как инженера был столь велик, что комиссия сочла возможным после всей этой истории настоячиво просить его продолжить консультации. Кулон был вынужден дать на это согласие, оговорив возможность привлечения еще одного военного инженера в качестве консультанта. В мае 1784 г. он отправился в Бретань и провел там два месяца вместе с капитаном инженерных войск шевалье дю Дезерселем. Работа военных инженеров была оценена Бретонскими Штатами довольно высоко. В 1785 г. было принято решение об их награждении: Дезерсель получил 4000 ливров, а Кулону была подарена золотая шкатулка, поскольку, как было записано в протоколе заседания Штатов, он не хотел «принимать никакого вознаграждения, ни даже получить компенсацию дорожных расходов».

Так закончилась эта весьма неприятная и хлопотная для Кулона история. Она еще раз продемонстрировала его высокую принципиальность в профессиональных вопросах и щепетильность в ведении личных дел. Кроме того, история с проектом системы каналов в Бретани¹ стала свидетельством возросшего авторитета Кулона как специалиста в инженерных вопросах.

Известность Кулона как квалифицированного инженера нашла отражение в его назначении на пост королевского интенданта вод и фонтанов. Инициатива в данном случае исходила от графа д'Ангвиллера, отвечавшего за системы водоснабжения, принадлежавшие королю. Д'Ангвиллер был очень активным и в отличие от многих других толковым государственным деятелем. В его обязанности, кроме надзора за системой водоснабжения, входил административный надзор за Академией художеств (Академией живописи и скульптуры), за знаменитыми королевскими мануфактурами по производству фарфора в Севре, за Обсерваторией, за мыловаренным производством и т. д. Ему, в частности, принадлежит основная заслуга в организации знаменитого художественного музея в Лувре. Д'Ангвиллер хорошо понимал, что

¹ Дальнейшая судьба этого проекта была печальной. Хотя в 1784 г. для его реализации были выделены некоторые средства и рабочая сила, постепенно работы по проекту прекратились.



Водоподъемный механизм в Марли, близ Версаля. С помощью нескольких десятков колес (на переднем плане) вода поднималась к акведуку (на заднем плане), по которому направлялась в специальный резервуар.

успех любого предприятия зависит прежде всего от подбора исполнителей, и для выработки и осуществления многих проектов приглашал крупных специалистов, членов Парижской академии наук. Поэтому не удивительно, что на должность интенданта вод и фонтанов он пригласил Кулона, несмотря на то что после истории с проектом системы каналов в Бретани прошло совсем немного времени.

К моменту назначения интендантом вод и фонтанов Кулон имел уже некоторый опыт в вопросах водоснабжения. В частности, в начале 1783 г. он вместе с тремя другими членами Академии наук участвовал в работе комиссии, исследовавшей эффективность паровых двигателей братьев Перрье, установленных в одном из королевских дворцов и служивших для подъема воды. Особенностью этих двигателей было то, что их чертежи и даже часть деталей были получены из Англии, от знаменитого конструктора Дж. Уатта и его компаньона М. Боултона. В марте 1783 г. после нескольких осмотров и испытаний этих машин по поручению комиссии Кулон подготовил доклад, который был зачитан на заседании академии. Интересно, что Кулон оказался первым, кто публично изложил во Франции принцип действия усовершенствованной паровой машины с конденсором. Отметим, что в период между избранием в академию и назначением интендантом вод и фонтанов Кулон более десяти раз выступал с докладами и сообщениями о различных системах насосов и каналов. Таким образом, выбор д'Ангвиллера был далеко не случайным.

На новый пост Кулон был назначен в июле 1784 г. В круг

его обязанностей входило поддержание в рабочем состоянии части системы водоснабжения Парижа, принадлежавшей королю Франции. Кроме того, в ведении Кулона находилось распределение воды, запасенной в специальном резервуаре, так называемом *Château d'eau*¹, управление системами водоснабжения, обеспечивавшими Версаль, Фонтенбло и другие королевские владения в окрестностях Парижа. Новое назначение Кулона было связано не только с инженерными работами. Ему приходилось также участвовать в сборе налогов и судебных процессах, связанных с частными концессиями на водоснабжение.

Однако основное время у интенданта вод и фонтанов занимали многочисленные мелкие технические проблемы: повреждение трубопроводов и акведуков, различного рода засоры, утечки и т. д. Сеть водоснабжения Парижа, ведущая свою историю от римских акведуков, в течение столетий много раз перестраивалась и к концу XVIII в. представляла собой очень сложную инженерную систему, требовавшую существенной модернизации. За период с 1784 по 1789 г. с участием Кулона были проведены работы по реконструкции большей части резервуаров — громадных акведуков — в Версале, перестроен Аркейский акведук в Париже, первый вариант которого был сооружен еще во время правления римского императора Юлиана, установлена гидравлическая машина в Компейне. Одним словом, служба в качестве интенданта вод и фонтанов короля не была для Кулона sinecурой. Точная дата, когда он был освобожден от этих обязанностей, неизвестна. Видимо, это произошло в начале 1790-х гг., уже после революции, когда менялась система управления городским хозяйством Парижа.

Имеются свидетельства, указывающие, что в предреволюционные годы Кулон был привлечен к еще одному виду деятельности. Со времен могущественного министра Людовика XIV — Кольбера во Франции изготовлялись рельефные карты (или просто рельефы) укрепленных портов и больших городов. Эти карты в масштабе и объеме воспроизводили застройку городов и их окрестностей. Они считались строго секретными, и для доступа к ним требовалось специальное разрешение государственного секретаря. Хранителем коллекции рельефных карт, насчитывавшей к 1780-м гг. около 130 карт, был Лашер д'Обанкур, офицер, под началом которого Кулон служил в течение десяти лет — с 1781 по 1791 г. Возможно, что д'Обанкур использовал Кулона не только для проведения работ в Бастилии, но и для надзора за рельефными картами.

И все же, несмотря на обилие поручений и разнообразие

¹ *Château d'eau* в буквальном переводе с французского означает «водяной дворец».

видов деятельности, к которым привлекали Кулона после перевода в Париж, его основные интересы были связаны с Академией наук.

Работа Парижской академии имела отчетливые организационные формы. Заседания проходили, как правило, два раза в неделю, по средам и субботам, после полудня. Посещение заседаний членами академии тщательно фиксировалось: каждый приходивший на заседание расписывался в регистрационной книге. Опоздавшие лишались небольшой платы, которая полагалась членам академии за присутствие на заседаниях. Известны случаи, когда за непосещение заседаний в течение длительного времени некоторые лица выводились из состава академии.

Члены академии были обязаны регулярно выступать с сообщениями о проводившихся ими исследованиях. Кроме того, они принимали участие в работе комиссий, учреждавшихся для выработки различных проектов, обсуждения планов, в оценке которых нуждалось правительство, анализе научных работ и изобретений, представленных в академию со стороны. Наконец, академики привлекались к административной работе в рамках самой академии (участие в различных комитетах, конкурсных комиссиях и т. д.). Кулон принимал участие практически во всех делах академии.

Об активности Кулона свидетельствуют такие данные. В период с 1773 по 1806 г. он представил в академию¹ тридцать два научных мемуара, из них семь — до избрания в академию, шестнадцать — в период после избрания до роспуска старой академии и девять — после организации Национального института. Эти мемуары касались главным образом физики и механики. Между 1781 и 1806 г. Кулон участвовал в подготовке 310 докладов в составе различных комиссий (более десяти раз в год!). Хотя основная часть докладов касалась механики, физики, а также проблем навигации, строительства гидросооружений, образования и военных вопросов, Кулону приходилось заниматься и весьма далекими от его непосредственных научных интересов проблемами здравоохранения, благоустройства Парижа и финансовыми проектами Национальной ассамблеи.

Много времени у Кулона отнимала и административная работа в академии. В течение многих лет он был членом ее библиотечного комитета. Кулон входил в состав жюри нескольких конкурсов, объявлявшихся академией. Не следует думать, что это была очень легкая работа. Так, на один из конкурсов, который был посвящен разработке нового водяного насоса для моста Нотр-Дам, было подано 45 (!) проектов, требовавших подробного рассмотрения.

¹ Здесь имеется в виду и Королевская академия наук, и Institut de France, заменивший после революции старую академию.

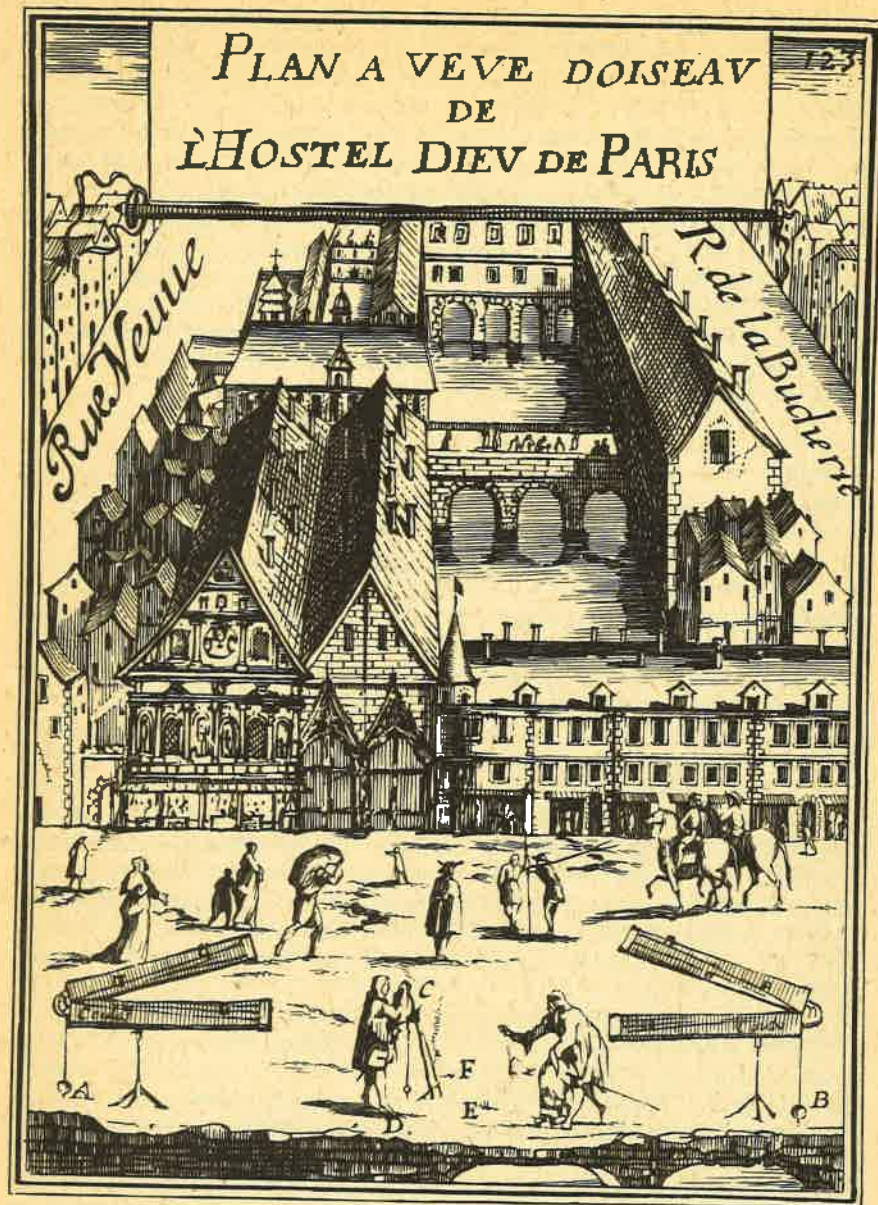
Кулон принимал участие в мероприятиях Парижской академии наук, имевших не только научное, но и социальное значение. Одно из них — это разработка проекта усовершенствования системы больниц в Париже. Мы уже имели возможность отметить чувство высокого гражданского долга, которое было присуще Кулону. Именно оно, по-видимому, привлекло внимание ученого к проблеме совершенствования системы здравоохранения. Еще находясь на службе в Шербуре, в одном из докладов, направленных в Париж, Кулон обращал внимание начальства на бедственное состояние Шербурской больницы. Он писал:

«В этой больнице лечатся 200 бедняков. В нее принимают детей, больных, немощных и раненых. Когда в Шербуре стоят войска, больные солдаты получают здесь койку. Годовой доход этой больницы не превышает 3000 ливров, а расходы составляют более чем 10 000 ливров. Работы бедняков и благотворительности не всегда достаточно, чтобы покрыть излишек расходов, и пациенты там часто испытывают недостаток в хлебе».

То, что Кулон сообщал о Шербурской больнице, можно было отнести и к больницам Парижа. Хроническая нехватка мест, скученность больных, невозможность изолировать страдающих от заразных болезней — это далеко не полный перечень проблем, касавшихся системы здравоохранения столицы Франции.

Хотя бедственное положение парижских больниц давно привлекало внимание ученых и общественных деятелей Франции, лишь в 1785 г. академия создала комиссию для рассмотрения проекта реформы больницы Отель-Дье, перестроенной после пожара 1772 г. Однако деятельность этой комиссии, в состав которой через некоторое время после ее организации вошел и Кулон, не ограничилась рассмотрением одного проекта. Результатом ее десятимесячной работы стал объемный доклад, в котором на основе изучения опыта других крупных городов были сформулированы конкретные предложения по перестройке системы больниц Парижа. Уже после представления этого доклада, в середине 1787 г., два члена комиссии, Ж. Тенон и Ш. Кулон, выезжали в Англию, где познакомились с опытом организации крупных больниц в Лондоне, Бирмингеме и Плимуте. Во время этого путешествия, длившегося почти два месяца, французские ученые встретились со многими представителями английской науки, в частности с президентом Лондонского королевского общества сэром Дж. Банксом и знаменитым изобретателем Дж. Уаттом.

Таким образом, мы видим, что в предреволюционные годы Кулон вел очень активный образ жизни. Для его деятельности характерны большое тематическое разнообразие и интерес к вопросам, имеющим не только чисто научную, но и общественную, а в некоторых случаях и социальную значимость. И все



Старейшая больница Парижа Отель-Дье (старинная гравюра).

же описанные в этой главе эпизоды жизни Кулона не дают полного представления о личности и интересах ученого, для которого главное — это исследовательская работа. В Париже в десятилетие с 1781 по 1791 г. Кулон находился в расцвете творческих сил. В это время он провел исследования, обессмертившие его имя. При этом если практическая работа Кулона была связана с его профессией инженера, то тематика исследований, как уже говорилось, все в большей степени тяготела к физике. В следующих главах пойдет речь о научных работах Кулона, выполненных им в Париже до начала революции. Эти работы представляют собой единую цепь экспериментов и теоретических построений, которая начинается с изучения кручения тонких нитей, а заканчивается опытами в области электричества и магнетизма.

Глава VII.

ИССЛЕДОВАНИЕ КРУЧЕНИЯ И ИЗОБРЕТЕНИЕ КРУТИЛЬНЫХ ВЕСОВ

В истории науки и техники нередки примеры, когда те или иные открытия и изобретения долго остаются незамеченными и не используются на практике. Так чаще всего бывает с работами, намного опередившими потребности того времени, когда они выполнены. Если же изобретение или открытие отвечает запросам эпохи, то оно сразу же «идет в дело». К числу подобных исследований относился и мемуар Кулона, посвященный проблеме изготовления магнитных стрелок, за который, как мы помним, ученый получил премию Парижской академии наук. На эту работу обратил внимание один из руководителей Парижской обсерватории Ж. Д. Кассини¹. Он попросил Кулона помочь создать прибор для изучения магнитного поля Земли, который основывался бы на принципах, изложенных в конкурсном мемуаре.

Кулон, естественно, охотно согласился помочь обсерватории. С 1780 г. в течение ряда лет он проводил испытания различных конструкций сверхчувствительного по тем временам прибора. На его пути встретилось множество трудностей. Оказалось, что стрелка, подвешенная на нити, очень чувствительна к колебаниям точки подвеса, а также к движению потоков воздуха, вызванных сквозняками и конвекцией, которая была обусловлена различием температуры слоев воздуха в закрытом помещении. Для устранения этих помех прибор Кулона был

перенесен в подвал обсерватории. Однако эта мера не привела к решающему изменению положения: теперь на первый план выступили новые помехи.

Кассини и его ассистенты обратили внимание на то, что стрелка прибора меняла свое положение при приближении глаза наблюдателя к окуляру, с помощью которого производились отсчеты ее положения. Кулон правильно указал причину этого явления. Она состояла в том, что на теле наблюдателя всегда имеется некоторое количество статистического электричества, которое индуцирует электричество противоположного знака на ближайшем к наблюдателю конце стрелки. Взаимодействие зарядов противоположного знака ведет к изменению положения стрелки. Создатель прибора указал два способа уменьшения этого вредного эффекта. Первый состоял в том, чтобы поместить стрелку не в деревянный, а в медный кожух, который выполнял бы роль экрана для внешних электростатических воздействий. Но использование медного кожуха не решило проблемы полностью, поскольку наличие отверстия для считывания показаний прибора не позволяло обеспечить полную экранировку внешних воздействий. Более эффективным, казалось, должен был быть второй способ, предложенный Кулоном. Ученый считал, что явление электростатической индукции сказывается здесь столь сильно, потому что стрелка подвешивается на шелковой (изолирующей) нити. Если же применить металлическую (проводящую) нить, имеющую электрический контакт с медным кожухом, то индукционные эффекты должны слабее сказываться на показаниях прибора. Однако реализовать эту идею Кулон смог далеко не сразу.

Как уже говорилось выше, малая упругость шелковых нитей и волос по отношению к кручению позволяла пренебречь возникающим моментом упругих сил и считать, что магнитная стрелка в точности следует за вариациями склонения. Металлические нити обладают гораздо большей упругостью, и без постановки специального исследования нельзя было заранее сказать, можно ли в том или ином случае пренебречь моментом упругих сил, возникающим при кручении таких нитей. Это обстоятельство и послужило для Кулона толчком к изучению кручения металлических нитей цилиндрической формы. Результаты его опытов были обобщены в работе «Теоретические и экспериментальные исследования силы кручения и упругости металлических проволок», законченной в 1784 г.

Хотя, как мы видели, причина, побудившая Кулона заняться изучением деформации кручения, была чисто практического свойства, исследователь поставил перед собой научные задачи. В начале своей работы Кулон писал:

«Этот мемуар имеет две цели: первая состоит в определе-

¹ Жан Доминик Кассини (1748—1845), известный также в истории астрономии как Кассини IV — представитель династии астрономов, более полутораста лет возглавлявших Парижскую обсерваторию.

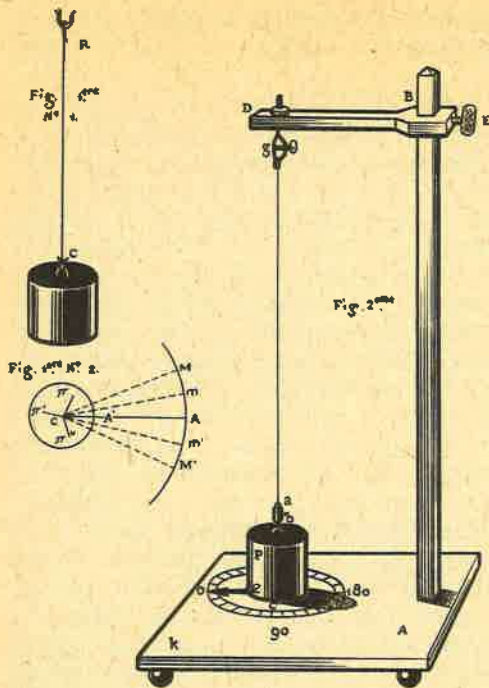


Рис. 17. Рисунок из работы Кулона, поясняющий его метод исследования кручения.

Ученый исследует кручение с помощью единого метода, основанного на наблюдении крутильных колебаний. Он так описал его сущность:

«Метод для определения на опыте силы кручения состоит в том, что на металлической нити подвешивается цилиндрический груз так, чтобы его ось была вертикальной и проходила бы через нить подвеса. Пока нить подвеса остается совершенно незакрученной, груз будет пребывать в покое; но если заставить груз повернуться вокруг своей оси, нить закрутится и создаст усилие для возникновения более или менее длительных колебаний в зависимости от того, насколько совершенна упругая реакция кручения. Если в экспериментах подобного рода тщательно фиксировать длительность определенного числа колебаний, то с помощью формул колебательного движения можно легко определить силу реакции кручения, которая вызывает эти колебания. Таким образом, варьируя вес груза, длину нити подвеса и ее толщину, можно надеяться определить закон реакции кручения в отношении натяжения, длины, толщины и природы этой нити».

нии силы упругости при кручении железных и латунных проволок в отношении их длины, толщины и степени натяжения... Вторая цель мемуара состоит в том, чтобы оценить несовершенства упругой реакции металлических проволок и исследовать, каковы следствия, которые можно [отсюда] вывести относительно законов [молекулярного] сцепления и упругости тел».

Таким образом, Кулон хотел более точно, чем в мемуаре 1777 г., определить зависимость момента упругих сил от длины нити l , ее диаметра d и угла закручивания φ и использовать результаты изучения кручения для выяснения характера межмолекулярного взаимодействия.

Столь же отчетливо Кулон описывает и конкретную экспериментальную установку, которой он пользовался (рис. 17).

«На маленькой подставке kA , поддерживаемой четырьмя ножками, находится кронштейн ABD ; стойка AB поднимается на высоту 4 фута¹, а поперечная горизонтальная балка DE скользит вдоль стойки и фиксируется с помощью винта E ; к цилиндру или грузу P в верхней части на продолжении его оси прикреплена игла. Эта игла захватывается внутренней частью зажима, верхняя часть которого удерживает нить подвеса... Верхний конец нити подвеса захватывается другим зажимом g , укрепленным на поперечной балке DE . На подставке kA , служащей основой всего прибора, помещается круг, разделенный на градусы, центр которого c должен лежать на продолжении оси цилиндра; к нижней части цилиндра крепится указатель eo , конец которого o направлен на деления круга».

При проведении экспериментов Кулон, как обычно, уделял много внимания деталям. Так, прежде чем начать исследование зависимости момента упругих сил от параметров проволоки, Кулон провел серию контрольных опытов, которыми показал, что свойства нити по отношению к кручению не зависят от силы натяжения нити в широком диапазоне изменения этой силы.

Измеряя период колебаний груза, подвешенного на исследуемой нити, меняя ее длину, диаметр², а также варьируя амплитуду колебаний, Кулон провел несколько серий опытов, итогом которых стал знаменитый закон кручения³:

$$M = B \frac{d^4}{l} \varphi,$$

где M — момент упругих сил, а B — постоянная, зависящая от материала проволоки.

Точность экспериментов Кулона можно до некоторой степени оценить, сравнив значения постоянной B , рассчитанной по данным его измерений, с соответствующими современными значениями. Например, для железа, по Кулону, $B = 7,6 \cdot 10^{10}$ Н/м², а современное значение $B = (7,5 \div 8,0) \times$

¹ 1 парижский фут = 32,48 см.

² Хотя Кулон не описывает метод, с помощью которого определяется диаметр нитей, судя по тексту его работ, можно с большей долей вероятности предположить, что он измерял массу нити определенной длины m , зная плотность металла и полагая сечение нити круглым, рассчитывал величину d .

³ В наши дни этот закон принято представлять в виде

$$M = Gb \frac{d^4}{l} \varphi,$$

где G — модуль сдвига материала, из которого сделана нить, b — численный коэффициент, зависящий от формы сечения нити; для круглого сечения $b = \pi/2$.

$\times 10^{10}$ Н/м². Эти данные свидетельствуют о довольно высокой точности опытов Кулона.

В одной из приведенных выше цитат из работы Кулона упоминаются «формулы колебательного движения» для анализа измерений. Кулон, хорошо знавший математику, без труда получил необходимые соотношения, описывающие крутильные колебания. Он понимал, что простыми формулами можно описать только линейные колебания, при которых период не зависит от амплитуды. Это условие выполняется, когда существует линейная зависимость между углом закручивания нити и моментом сил упругости. На опыте обнаружилось, что период колебаний не зависит от амплитуды только в определенном диапазоне амплитуд. Иными словами, пока угол закручивания нити не превышает определенного значения $\varphi_{упр}$, называемого пределом упругости, момент силы упругости пропорционален φ ; при больших углах момент силы упругости растет медленнее, чем угол φ .

Кулону было известно, что упругие свойства металлов зависят от их механической и тепловой обработки. Он сам проверил, какковка и отжиг влияют на упругие свойства тонких нитей по отношению к кручению. Выяснилось, что постоянная B в законе кручения практически не зависит от характера обработки, а вот величина $\varphi_{упр}$ зависит от него очень сильно. Используя результаты этих опытов, Кулон высказал гипотезу о характере межмолекулярного взаимодействия, которое в XVIII в. принято было называть «сцеплением».

Ученый пришел к выводу, что при относительно небольших деформациях кручения происходит обратимое изменение формы молекул, приводящее к возникновению упругой силы и соответствующего момента. При этом расстояния между молекулами остаются неизменными. При значительных деформациях меняется относительное расположение молекул (возникает скольжение слоев) и, следовательно, силы межмолекулярного взаимодействия становятся иными. Вследствие этого при снятии нагрузки образец не полностью восстанавливает свою первоначальную форму — возникает неупругая деформация; при очень больших деформациях смещение слоев молекул приводит к разрушению образца.

Картина деформаций, нарисованная Кулоном, конечно, во многих своих чертах отличается от современной. Однако общая причина возникновения неупругих деформаций — сложная зависимость сил межмолекулярного взаимодействия от расстояния между молекулами — указана Кулоном правильно. Глубину его идей о природе деформаций отмечали многие ученые XIX в., в том числе такие известные, как Т. Юнг.

Исследование кручения тонких металлических нитей, выполненное Кулоном, имело важное практическое след-

ствие — создание крутильных весов. Этот прибор мог использоваться для измерения малых сил различной природы, причем он обеспечил чувствительность, беспрецедентную для XVIII в. Как уже отмечалось, впервые мысль о возможности использования тонких нитей для подвески магнитных стрелок была высказана еще в XVII столетии. Упоминания о нитяном подвесе встречаются и в произведениях ученых XVIII в. Однако до Кулона никто не пытался использовать крутильный подвес для создания измерительного прибора¹.

Пример использования крутильных весов для изучения сил, измерение которых другими методами затруднительно, Кулон дал в своем мемуаре 1784 г. Этот пример касался явления внутреннего (вязкого) трения, определяющего многие эффекты в газах и жидкостях. Идея опытов Кулона поясняется следующим отрывком из его работы:

«В сосуде $ADBE$ (рис. 18), наполненном жидкостью, сцепление которой хотели исследовать, с помощью медной проволоки подвешивается цилиндр $abcd$, сделанный из меди или свинца; над сосудом помещают кольцо $A'F'B'$, разделенное на градусы; это кольцо находится на одном уровне с концом d указателя id , прикрепленного к цилиндру.

Если цилиндр повернуть вокруг вертикальной оси, нарушая его ориентации по вертикали, с помощью маленького указателя можно наблюдать, насколько меняется каждое колебание; и поскольку сила кручения нити, которая создает эти колебания, известна из предшествующих опытов и можно также узнать изменение, обусловленное неидеальной упру-

¹ В 1798 г. английский естествоиспытатель Г. Кавендиш провел с помощью крутильных весов опыт по измерению средней плотности Земли. Весы, которыми он пользовался, были построены на основе идеи, принадлежащей его соотечественнику Дж. Мичеллу (1724—1793). В работе с изложением результатов опыта Кавендиш утверждает, что крутильные весы были задуманы Мичеллом задолго до того, как в печати появилась работа Кулона с описанием его изобретения. Однако никаких других доказательств приоритета Мичелла нет. Поэтому большинство историков науки считает, что Мичелл и Кулон изобрели крутильные весы независимо друг от друга. При этом, однако, следует учитывать, что у Кулона было важное преимущество: он провел практически исчерпывающее исследование кручения нити — явления, на котором основано действие весов. Свидетельство о проведении Мичеллом соответствующих опытов не имеется.

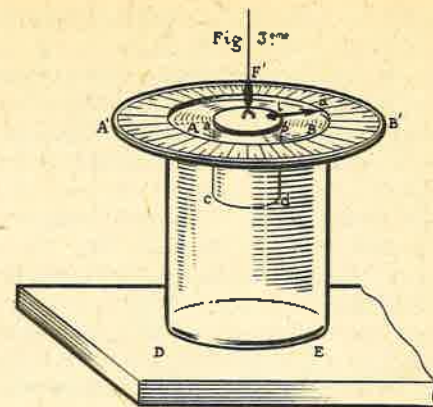


Рис. 18. Схема опытов Кулона по изучению внутреннего трения.

гостью, заставляя цилиндр колебаться в пустоте или даже в воздухе, то можно надеяться с помощью этих средств найти постоянную величину, обусловленную сцеплением».

Вопрос о внутреннем трении в жидкости анализировался многими учеными до Кулона как в экспериментальном, так и в теоретическом плане. Достаточно сказать, что движение тел в вязкой жидкости посвящена не одна страница ньютоновских «Начал». Однако до Кулона у ученых не было единой точки зрения на то, каким законом описывается зависимость силы сопротивления, испытываемой телом при движении в жидкости, от скорости тела. Большинство считало, что эта сила пропорциональна квадрату скорости, однако имелись и другие суждения. Отсутствие единства во взглядах ученых объяснялось прежде всего несовершенством методики измерения силы сопротивления. Кулон справедливо считал, что метод крутильных колебаний очень подходит для экспериментального решения задачи в случае медленных движений тела в жидкости. Начав рассмотрение вопроса в мемуаре 1784 г., ученый дал его более полное решение много лет спустя, в работе 1800 г., которая называлась «Опыты, посвященные определению сцепления жидкостей и закона их сопротивления при очень медленных движениях». В этой работе Кулон особенно отчетливо показал преимущества изобретенного им метода.

До Кулона исследования сопротивления жидкостей движению тел проводились в основном двумя способами. Первый состоял в наблюдении затухания колебаний математического или физического маятника при движении в вязкой жидкости. Второй способ был основан на буксировке плота или лодки. Кулон указал на трудности в интерпретации результатов, возникающие при исследовании этими методами. Мы перечислили лишь основные из них. Применение маятников (этот метод широко использовался Ньютоном) связано с учетом выталкивающей силы, действующей на груз, подвешенный на нити или закрепленный на стержне. Для однозначности анализа результатов опыта необходимо соблюдать условие малых амплитуд, что затрудняет точное измерение закона уменьшения амплитуды колебаний с течением времени. Кроме того, и стержень физического маятника, и нить математического маятника создают волны на поверхности жидкости, из-за которых возникает дополнительное сопротивление. Метод буксировки также связан с возникновением волнения, что особенно сильно сказывается на результатах экспериментов при их проведении в условиях лаборатории, когда площадь поверхности жидкости ограничена.

Метод крутильных колебаний, описанный Кулоном, лишен многих из перечисленных недостатков. Так, поскольку все точки цилиндрического тела, испытывающего крутильные колебания, движутся в горизонтальных плоскостях, вытал-

кивающая сила никак не сказывается на результатах опыта. При медленных колебаниях тела волнения на поверхности жидкости практически не возникает. Кулон подчеркивал и то преимущество своего метода, что скорость движения тела может регулироваться путем изменения длины нити подвеса или ее диаметра. Условия измерения затухания в данном случае облегчаются тем, что при крутильных колебаниях максимальный угол закручивания (амплитуда колебаний) может быть достаточно большим (сотни градусов). Следует ради справедливости отметить, что Кулон трезво смотрел на достоинства своего метода. Он, в частности, понимал, что при очень быстрых колебаниях в жидкости могут возникать турбулентные движения; для этого случая он считал более перспективным использование метода буксировки.

Как и в других работах, при изучении сопротивления жидкости Кулон сначала получает теоретические соотношения между измеряемыми величинами, а затем переходит к экспериментам. И здесь он проявляет предельное внимание к деталям. Ему, например, известно о зависимости вязкости жидкости от ее температуры, поэтому температура воды и других исследуемых жидкостей контролируется. Информация, которую получает Кулон в ходе опытов, разнообразна. Он сравнивает величины силы сопротивления, возникающей в воде и различных маслах. Меняя степень шероховатости поверхности цилиндра, он проверяет, зависит ли сила сопротивления от характера обработки поверхности, и получает парадоксальный на первый взгляд результат: сопротивление жидкости не зависит от шероховатости поверхности. Из этого результата Кулон делает правильный вывод о том, что основной вклад в силу сопротивления вносит взаимодействие между молекулами жидкости и что их взаимодействие с молекулами поверхности твердого тела играет второстепенную роль.

Особенно тщательно Кулон исследует зависимость силы сопротивления от скорости движения тела. В его опытах скорость движения тела варьируется от долей миллиметра до нескольких сантиметров в секунду. В итоге ученый приходит к выводу, что при очень малых скоростях (меньших нескольких миллиметров в секунду) сила сопротивления пропорциональна скорости, при больших скоростях она становится пропорциональной квадрату скорости. Кроме того, Кулон предполагал, что в выражение для силы сопротивления может входить малое слагаемое, не зависящее от скорости, однако вынести суждение о величине этого слагаемого на основе опытов он не смог. За исключением гипотезы о существовании постоянного слагаемого в выражении для силы сопротивления, выводы Кулона относительно этой силы были правильными. Его соображения о молекулярной природе внутреннего трения также представляют интерес для истории

становления представлений об этом физическом явлении. Однако подробное обсуждение этого вопроса здесь вряд ли возможно.

Итак, в 1784 г. Кулон создал чувствительный прибор для измерения малых сил и на примере исследования вязкого трения продемонстрировал его эффективность. В мемуаре 1784 г. ученый сообщает, что им сконструированы крутильные весы для измерения электрических и магнитных сил. Эти весы он обещает описать в другой работе. Свое обещание Кулон исполнил в 1785 г., когда представил в Парижскую академию наук свой первый мемуар из цикла работ по электричеству и магнетизму, который по праву считается вершиной его научного творчества. Однако, для того чтобы понять, какую роль исследования Кулона сыграли в истории учения об электричестве, нам необходимо кратко познакомиться с тем, что было сделано в этой области до него.

Глава VIII.

ПОИСКИ «ЗАКОНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИЛЫ» ДО КУЛОНА

Свойство натертого янтаря притягивать легкие предметы было известно еще древнегреческим ученым. Однако в течение многих веков явление электростатического притяжения не было тщательно исследовано. Одной из первых работ, где вопрос о притяжении наэлектризованных тел обсуждался достаточно подробно, была уже упоминавшаяся книга У. Гильберта «О магните». В ней описаны новые опыты с электричеством и даже предложен первый электрический прибор — стрелка на острие — прототип электроскопа. Однако опыты Гильберта не привели к коренному изменению представлений об электричестве и его проявлениях. Причина этого ясна: пока электризация тел могла производиться лишь посредством натирания стеклянной палочки шерстью, вряд ли можно было ожидать получения каких-либо принципиально новых результатов. Понятно поэтому, какое оживление в электрические исследования внесло изобретение О. Герике (1602—1686) первой электрической машины (1660 г.), которая позволила значительно упростить наблюдение электрических явлений.

Машина Герике представляла собой шар из серы, насаженный на горизонтальную ось (рис. 19). С ее помощью можно создать значительную электризацию: для этого экспериментатор должен касаться рукой вращающегося шара. До изобретения Герике исследования в области электричества находились в тени опытов по магнетизму, обладавших важным преимуществом — их было



Рис. 19. Электростатическая машина О. Герике.

гораздо проще воспроизводить. Электростатическая машина сделала и электрические опыты надежно воспроизводимыми.

Новые наблюдения не заставили себя долго ждать. Английский ученый Ф. Гауксби (ок. 1670—1713), усовершенствовавший электростатическую машину (1706 г.), провел опыты по электризации тел в разреженном воздухе и обнаружил, что вокруг наэлектризованных тел возникает свечение (1710 г.). Он же впервые наблюдал явление, получившее название «электрический ветер». В 1729 г. англичанин С. Грей (1666—1736), исследуя «передачу электричества», открыл явление электропроводности.

Заслуги этих ученых несомненны. Следует, однако, помнить, что выделение существенных результатов, полученных Гауксби и Греем, из массы второстепенных наблюдений происходило постепенно, по мере развития науки об электричестве. Сами экспериментаторы начала XVIII в. далеко не всегда улавливали, что в их опытах главное.

Первая половина XVIII в. — это период не только накопления экспериментальных фактов, относящихся к электричеству, это и период поиска адекватных понятий для описания проводимых опытов. В это время отсутствовала специфическая для этой области физики терминология. Проблема выработки системы понятий всегда актуальна на этапе формирования какого-либо раздела науки. Для примера укажем историю механики от Аристотеля до Галилея и Ньютона: в определенном смысле это история поисков системы понятий для описания движения тел. Эта система была построена лишь в конце XVII столетия, после

чего механика стала эталоном научной дисциплины. Как мы увидим в дальнейшем, именно установление связи между механическими и специфическими электрическими понятиями позволило перейти от качественных исследований в области электричества к исследованиям количественным.

Однако вернемся к экспериментам первой половины XVIII в. К этому времени относится постановка и реализация первой исследовательской программы по электричеству. Ее автором был французский физик Ш. Дюфэ (1698—1739), обратившийся к электрическим опытам под влиянием работ С. Грея. В течение двух лет (1733—1734 гг.) Дюфэ опубликовал шесть мемуаров, каждый из которых был посвящен рассмотрению одного из вопросов, относящихся к электричеству, предварительно сформулированных ученым. Дюфэ удалось правильно уловить многие ключевые проблемы науки об электричестве. Однако он ставил лишь сугубо качественные вопросы, имевшие общий, несколько неопределенный характер. Поэтому и ответы на них часто звучат довольно расплывчато.

Как показала история, важнейший вывод Дюфэ состоял в том, что «существуют два рода электричества, отличных друг от друга, а именно стеклянное и смоляное, из которых одно притягивает тела, отталкиваемые другим». Значение этого открытия, однако, принижалось соседством с таким, например, заключением: «Сжатый воздух внутри трубки, так же как и разреженный, мешает, по-видимому, внешним проявлениям электричества». Среди выводов, сделанных ученым на основе анализа многочисленных опытов, встречаются и другие неточные и даже ошибочные заключения.

Переход к принципиально новому этапу исследований стал возможен лишь после создания сколь-нибудь последовательной теории электрических явлений. Такая теория была впервые сформулирована Б. Франклином (1706—1790) в 1750 г. Ее постулаты сводятся к следующему:

«1. Электрическая субстанция состоит из чрезвычайно малых частиц...

3. Электрическая субстанция отличается от обыкновенной материи в том отношении, что частицы последней взаимно притягиваются, а частицы первой отталкиваются друг от друга...

4. И хотя частицы электрической субстанции взаимно отталкивают друг друга, они сильно притягиваются всей прочей материей».

Из этих постулатов видно, что Франклин не принял выводов Дюфэ и разработал унитарную теорию: электризация тела зарядом одного знака соответствовала в этой теории превышению количества электрической субстанции над равновесным, а электризация зарядом противоположного знака — недостатку электрической субстанции. Идеи Франклина получили широкое распространение. Хотя ученому и удалось успешно объяснить

многие электрические явления, его теория имела существенный дефект — она была чисто качественной.

Подход Франклина к анализу электрических явлений был развит петербургским академиком Ф. Эпинусом (1724—1802) в работе «Опыт теории электричества и магнетизма» (1759 г.). Однако и Эпинусу не удалось придать теории количественный характер. В «Предисловии» к указанной работе он писал:

«Я ввел в эту книгу несколько алгебраических выкладок, правда кратких и нетрудных, частью принужденный к тому самой природой предмета, частью, как я указываю на это в самой книге, чтобы избежать многословия обычной речи. Я уверен, что это не вызовет недовольства ни с чьей стороны».

И все же в работе Эпинуса имеется одно важное новшество: в ней обсуждается количественная характеристика электрического отталкивания и притяжения — сила. Эпинус обсуждал и вопрос о функциональной зависимости этой силы от расстояния:

«...определить эти функциональные зависимости я пока что не решаюсь. Впрочем, если бы понадобилось произвести выбор между различными функциями, то я охотно утверждал бы, что эти величины изменяются обратно пропорционально квадратам расстояний. Это можно предположить с некоторым правдоподобием, ибо в пользу такой зависимости, по-видимому, говорит аналогия с другими явлениями природы».

Использование Эпинусом аналогии при формировании гипотезы о функциональной зависимости сил электрического взаимодействия имеет очевидное объяснение. Успехи небесной механики, основанной на законе всемирного тяготения, продемонстрировали плодотворность ньютоновского метода анализа физических явлений. Кроме того, особенности зависимости

$$F \sim \frac{1}{R^2}, \quad (1)$$

где F — сила, действующая между взаимодействующими объектами, а R — расстояние между ними, были относительно хорошо изучены. Поэтому почти все попытки экспериментального исследования электрических сил сводились по существу к проверке указанного соотношения. Однако правильная догадка о виде того или иного физического закона в экспериментальной физике еще не гарантирует успеха. История изучения электричества лишний раз подтвердила эту очевидную истину.

Первые опыты по определению зависимости $F(R)$ для электрических взаимодействий относятся к середине XVIII в. На первом этапе количественных исследований по электричеству отсутствовало ясное понимание различия между так называемыми пондеромоторными силами, действующими между макроскопическими заряженными телами, и силами, действующими между «элементарными» зарядами. Это обстоятельство в

ряде случаев привело к неправильной интерпретации экспериментальных результатов. Примером могут служить опыты Д. Бернулли (1700—1782), проведенные им около 1750 г., результаты которых были опубликованы его учеником А. Со-сеном.

Бернулли воспользовался устройством, которое было предложено в 1749 г. французскими физиками д'Арси и Ле-Руа и получило название гидростатического электрометра. В сосуде с водой плавало чечевицеобразное тело, которое в верхней части заканчивалось калиброванной стеклянной трубкой. На этой трубке крепился диск из проводящего материала. В нижней части тела имелся крюк, к которому можно было подвешивать грузы разной массы. Измерения проводились следующим образом. На некотором расстоянии x над диском на трубке закреплялся другой проводящий диск того же диаметра, соединявшийся проводником с электростатической машиной на все время проведения опыта. Верхней пластине сообщался некоторый заряд. Вследствие электростатической индукции на нижней пластине наводился заряд противоположного знака. После этого экспериментатор определял, перегрузок какой массы следует подвесить на крюк в нижней части тела, для того чтобы расстояние между пластинами осталось равным x . Затем опыт проводился при другом значении x . На основе полученных результатов Бернулли пришел к выводу, что сила электростатического взаимодействия убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Однако ясно, что опыты Бернулли не имеют непосредственного отношения к закону Кулона: здесь в ходе опыта при изменении x сохранялась постоянная разность потенциалов между пластинами, при этом заряд на них, естественно, менялся. Если приближенно рассматривать устройство Бернулли как плоский конденсатор, то пондеромоторная сила, действующая между пластинами, $F \sim q^2$, где q — заряд на пластинах. В свою очередь при постоянстве напряжения на пластинах $q \sim 1/x$ и, следовательно, $F \sim 1/x^2$. Таким образом, полученный результат лишь внешне сходен с законом Кулона; при изменении формы взаимодействующих тел зависимость силы от расстояния между ними может быть иной.

Не слишком критичное отношение современников к результатам измерения электрических сил во многом объясняется тем, что, как отмечал в одном из писем выдающийся итальянский физик А. Вольта (1745—1827), многие исследователи заранее придерживались «мнения, что электрическое действие обратно пропорционально квадрату расстояния».

Решение проблемы установления «закона электрической силы» состояло в том, чтобы найти экспериментальную ситуацию, в которой пондеромоторные силы совпадали бы с силами, действующими между элементарными зарядами.

Правильный подход к этой проблеме был найден независимо от Кулона и, возможно, раньше его английским естествоиспытателем Дж. Робайсоном (1739—1805).

Экспериментальный метод, использованный Робайсоном, основывался на идее о том, что взаимодействующие заряды можно считать точечными, если размеры сфер, на которых они локализованы, много меньше расстояния между центрами сфер. Установка, с помощью которой Робайсон проводил измерения, подробно описана в его фундаментальном труде «Система механической философии», изданном уже после его смерти, в 1822 г., известным шотландским физиком Д. Брюстером. Общий вид этой установки показан на рисунке 20. Она состояла из латунного шарика A и двух позолоченных пробковых шариков B, D , укрепленных на очень легкой стержне, который мог свободно поворачиваться в вертикальной плоскости относительно точки C . Шарик A располагался на Π -образном стеклянном стержне $AFEL$, который можно было поворачивать относительно оси FN с помощью рукоятки I . Опыт состоял в том, что шарикам A и B сообщались одноименные заряды, вследствие чего они отталкивались и стержень BD отклонялся от нити AL . При этом с помощью шкалы o и указателя NH измерялся угол α между нитью AL и вертикалью в плоскости стержня $AFEL$, а потом и угол β между стержнем BD и той же вертикалью. Затем поворотом рукоятки I изменялся угол α , определялось новое значение β и т. д. Если знать углы α и β , а также массы шариков B и D , то можно рассчитать силу электрического взаимодействия между зарядами, находящимися на шариках A и B , а имея данные для разных значений α , нетрудно определить зависимость этой силы от расстояния между ними.

Легко сообразить, что этот же прибор можно использовать и для исследования сил притяжения, возникающих, когда шарикам A и B сообщаются заряды разных знаков. Для этого требуется повернуть стержень $AFEL$ так, чтобы в отсутствие зарядов на A и B шарик A находился выше шарика B .

Робайсон писал, что проделал много сотен измерений, которые согласовывались между собой, «превосходя ожидания», и показал, что две заряженные сферы отталкиваются друг от

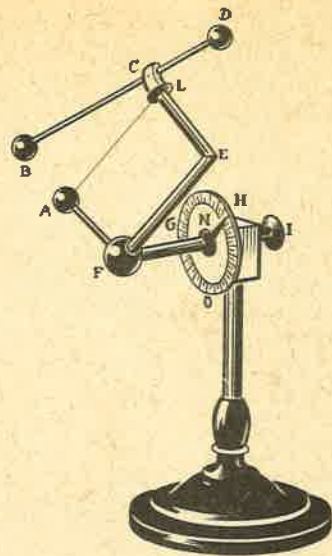


Рис. 20. Прибор Дж. Робайсона для исследования взаимодействия «точечных» зарядов.

друга обратно пропорционально расстоянию в степени 2,06. Учитывая погрешности измерений, Робайсон пришел к выводу, что «действие между сферами в точности пропорционально обратному квадрату расстояния между их центрами».

Причина, по которой основной закон электростатики не носит имя Робайсона, состоит в том, что о полученных результатах ученый сообщил лишь в 1801 г., а подробно описал еще позднее. Его утверждение, что об опытах по измерению электрических сил он публично докладывал еще в 1769 г., некоторые историки науки расценивают как ошибку памяти. Так или иначе исследование Робайсона не оказало какого-либо воздействия на прогресс науки об электричестве, хотя описанные им опыты и представляют значительный интерес для истории развития количественных методов в физике.

Наряду с опытами по непосредственному измерению силы электростатического взаимодействия с середины XVIII в. проводились эксперименты, с помощью которых ученые пытались определить зависимость $F(R)$, не измеряя самой силы.

Еще со времен Ньютона было известно, что тело, помещенное внутрь сферической оболочки, не испытывает со стороны этой оболочки гравитационного воздействия. Этот вывод непосредственно основывался на зависимости (1) для сил тяготения. Аналогия между действием сил тяготения и электричества указывала на возможность проверки соотношения (1) для электрических сил с помощью «нулевого» метода. Однако использована эта возможность была далеко не сразу.

В 1755 г. В. Франклин в одном из писем описал эксперимент, результаты которого он объяснить не мог.

«...Поставив серебряную коробку объемом в одну пинту на электрическую скамью, я наэлектризовал ее и затем опустил в нее на шелковой нити шарик из пробки, диаметром приблизительно в один дюйм, до самого дна коробки. Внутренняя поверхность коробки не стала притягивать пробковый шарик, как это происходит в случае наружной ее поверхности, и хотя шарик дотронулся до дна коробки, все же, когда его вытянули из коробки, оказалось, что при этом касании он не наэлектризовался, как это бывает при соприкосновении с наружной поверхностью коробки. Факт этот представляется мне совершенно необычным. Вы спрашиваете о причинах — мне они неизвестны».

Позднее Франклин познакомился с начинающим естествоиспытателем Дж. Пристли (1733—1804) и посоветовал ему заняться исследованиями по электричеству. Итогом работы Пристли в этой области стало сочинение «История и современное состояние электричества с оригинальными опытами», впервые опубликованное в 1767 г. Оно заканчивается описанием опытов самого Пристли, которые, по его словам, были проведены по совету Франклина и по существу являлись расширенным воспроизведе-

нием описанного выше эксперимента американского естествоиспытателя. Вывод из опыта Пристли сформулировал так:

«Можно ли не заключить из этого эксперимента, что притяжение электричества подчиняется тем же законам, что и тяготение, и поэтому меняется соответственно квадратам расстояния; поскольку легко показать, что если бы Земля имела форму оболочки, то тело, находящееся внутри ее, не притягивалось бы к одной стороне сильнее, чем к другой».

Пристли в отличие от Эпинуса подкрепил гипотезу, высказанную по аналогии, опытом, хотя и весьма примитивным. Однако детали приведенного выше отрывка показывают, что аналогия, которой руководствовался Пристли, довольно грубая и что ученый ограничился лишь поверхностным анализом сделанных им наблюдений. Он, например, говорит о «силах притяжения», хотя в описанном опыте притяжение не играет по существу никакой роли; не обращает внимания на то, что гравитационное воздействие на пробное тело, помещенное внутри оболочки, не наблюдается только в случае ее сферической формы, в его же опыте использовался «оловянный кубок», форма которого была очень далекой от сферической симметрии, и т. д. Таким образом, вывод Пристли представляется недостаточно обоснованным.

Впервые более или менее строгое подтверждение закона «обратных квадратов» с помощью «нулевого метода» было дано выдающимся английским физиком и химиком Г. Кавендишем около 1773 г. Схема установки, которую использовал Кавендиш, показана на рисунке 21. Ученый применял две полусферы (H и h), покрытые станиолом, которые охватывали внутренний шар G . Опыт проводился следующим образом. Соединив полусферы, внутри которых находился шар G , Кавендиш заряжал их, затем приводил полусферы в электрический контакт с внутренним шаром G , потом размыкал контакт и, разделив полусферы, удалял их. После этого он проверял (с помощью простейшего электроскопа из двух пробковых шариков, висящих на стеклянной палочке Tt), не перешла ли часть заряда внешних полусфер на внутренний шар G . Уровень экспериментов Кавендиша значительно превосходил уровень опытов Пристли. Кавендиш постарался исключить возможные погрешности опыта и, главное, определил верхний предел того заря-

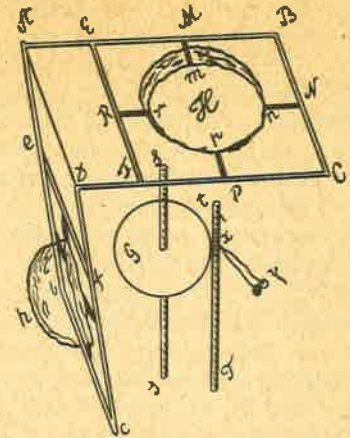


Рис. 21. Рисунок Г. Кавендиша со схемой установки для определения «закона электрической силы».

да, который он мог бы обнаружить на шаре G , если бы закон «обратных квадратов» строго не выполнялся и действительно имело место перетекание части заряда с внешних полусфер на внутренний шар. По его оценкам, эта величина составляла не более $1/60$ заряда внешних полусфер. Поскольку в действительности передачи заряда не наблюдалось, то на основании соответствующих математических выкладок он сделал вывод:

«Таким образом, мы можем заключить, что электрическое притяжение и отталкивание должно быть обратно пропорционально расстоянию в степени, лежащей между $2 - 1/50$ и $2 + 1/50$, и нет оснований полагать, что закон отличается от закона обратных квадратов».

На первый взгляд кажется, что основной закон электростатики должен носить имя не Кулона, а Кавендиша. Однако это суждение несправедливо. Дело в том, что Кавендиш по неизвестным причинам не опубликовал результаты своих исследований. Описание результатов его опытов обнаружил среди рукописей Кавендиша великий английский физик Дж. Максвелл (1831—1879) лишь спустя столетие после их проведения. И хотя после публикации в 1879 г. сборника работ Кавендиша по электричеству ученый мир по достоинству оценил остроумие и оригинальность его экспериментов, результаты, полученные этим «физиком-отшельником», не оказали влияния на развитие науки об электричестве. Однако, даже если бы Кавендиш опубликовал свои результаты, электрические исследования Кулона, выполненные более чем на десятилетие позже, не потеряли бы своего значения.

Глава IX.

РАБОТЫ КУЛОНА ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ И МАГНЕТИЗМУ

Выдающиеся исследователи, к числу которых безусловно относятся и Кулон, практически каждой своей работой вносят вклад в сокровищницу знаний. И все же почти у каждого ученого есть одна или несколько работ, благодаря которым его имя приобретает особую известность. Для Кулона ключевыми стали эксперименты по электричеству и магнетизму. Однако путь, приведший его к этим экспериментам, был очень непростым.

Два факта из жизни Кулона привлекают внимание в связи с его исследованием электрических и магнитных взаимодействий. Первый, относящийся к юности, — это лекции известного экспериментатора в области электричества аббата Нолле, которые Кулон слушал в Мезьерской школе. Второй факт — встреча с электростатическими явлениями при установке прибора для изучения магнитного поля Земли в Парижской об-

серватории. Лекции Нолле как бы подготовили почву, а наблюдения в обсерватории дали толчок к работам Кулона по электричеству и магнетизму.

В современной физике нередки случаи, когда тот или иной ученый всю жизнь посвящает разработке, совершенствованию и применению какого-то одного экспериментального метода. В XVIII в., когда традиции физического эксперимента только формировались, таких примеров можно насчитать единицы. И среди них — Кулон и его методика измерения малых сил с помощью крутильных весов. Разработав точнейший физический прибор, Кулон стал искать ему достойное применение. Случай в обсерватории подтолкнул мысль ученого в нужном направлении.

Итак, закончив исследование кручения, Кулон начинает работу над проблемами электричества и магнетизма. И если в названии первого мемуара (1785 г.) еще прослеживается связь с темой предшествующего исследования: «Конструкция и применение электрических весов, основанных на свойстве металлических проволок иметь силу кручения, пропорциональную углу кручения», то в дальнейшем эта связь ослабевает. Семь мемуаров Кулона представляют реализацию редкой для XVIII в. по широте программы исследований. Для того чтобы читатель в целом представил последовательность задач, решавшихся Кулоном, мы приведем названия остальных мемуаров.

Второй мемуар (1785 г.): «В котором определяется, согласно каким законам действует магнитная жидкость, так же как и жидкость электрическая при притяжении и при отталкивании».

Третий мемуар (1785 г.): «О количестве электричества, которое теряет изолированное тело за определенный промежуток времени как путем контакта с более или менее влажным воздухом, так и через опору более или менее идиоэлектрическую».

Четвертый мемуар (1786 г.): «В котором доказаны два принципиальных свойства электрической жидкости: первое, что электрическая жидкость ни в одном теле не распространяется при помощи химического сродства или избирательного притяжения, но что она распространяется между различными телами, приведенными в соприкосновение, только благодаря своему отталкивающему действию; второе, что в проводящих телах эта жидкость в состоянии равновесия распространяется по поверхности тел и не проникает внутрь».

Пятый мемуар (1787 г.): «О способе, которым электрическая жидкость разделяется между двумя проводящими телами, приведенными в соприкосновение, и о распределении этой жидкости на различных частях поверхности тел».

Шестой мемуар (1788 г.): «Продолжение исследования

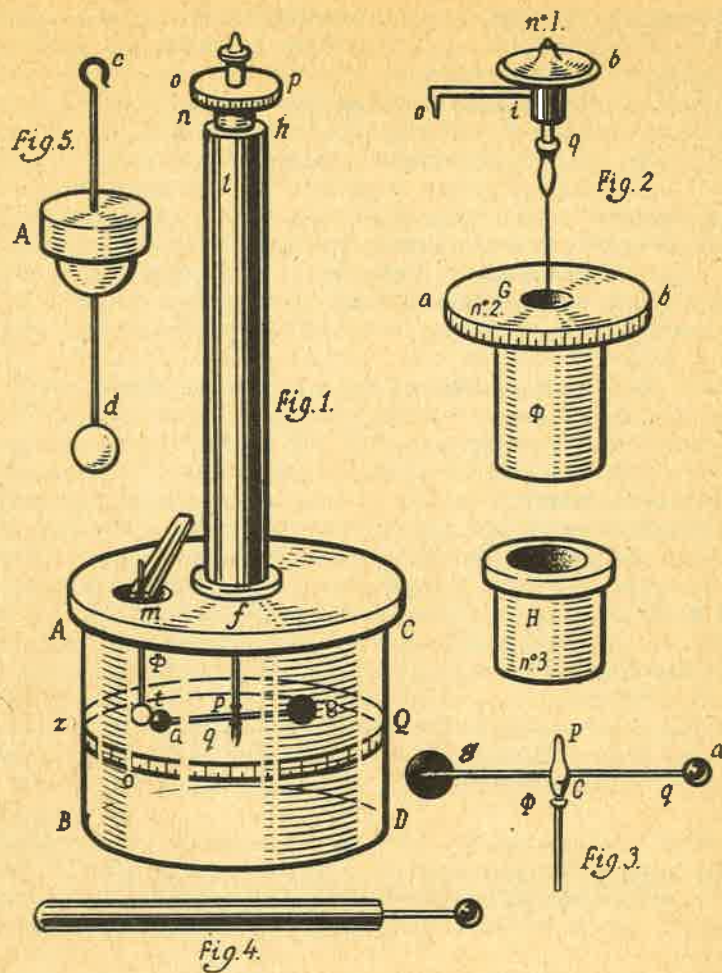


Рис. 22. Схема установки Кулона для исследования сил электростатического отталкивания.
 Fig. 1 — весы;
 Fig. 2 и 3 — отдельные узлы весов;
 Fig. 4 и 5 — специальные приспособления для проведения опытов.

распределения электрической жидкости между несколькими проводниками. Определение электрической плотности в различных точках поверхности этих тел».

Седьмой мемуар (1789 г.): «О магнетизме».

Важнейшим результатом, полученным Кулоном в области электричества, было установление основного закона электростатики — закона взаимодействия неподвижных точечных за-

рядов. Экспериментальное обоснование знаменитого «закона Кулона» составляет содержание первого и второго из перечисленных выше мемуаров.

В первом мемуаре Кулон с присущей ему тщательностью описывает конструкцию созданных им «электрических весов». Этот шедевр экспериментального искусства заслуживает того, чтобы быть описанным подробно.

Устройство весов показано на рисунке 22. Основная часть крутильных весов — тонкая серебряная нить длиной 75,8 см — помещалась внутри двух цилиндров (рис. 22.1): l и $ABCD$. Верхний конец нити закрепляется в специальном держателе q (рис. 22.2), соединенном с поворотной головкой b , на которой крепился указатель o . На вершине цилиндра l устанавливалась трубка p , на выступающем ребре которой были нанесены градусные деления. На нижнем конце нити с помощью специального захвата РСФ (рис. 22.3) удерживался составной цилиндр-коромысло agg , на одном конце которого располагался бузиновый шарик a (диаметром от 4,5 до 6 мм), а на другом — пропитанный скипидаром бумажный диск g , служивший противовесом шарика a и, по выражению Кулона, «замедлявший колебания». Часть цилиндра gg была изготовлена из шелковой нити, натертой испанским воском, а часть aq — из шеллака¹, служившего хорошим изолятором. Длина всего цилиндра составляла 21,7 см. Нижняя часть серебряной нити и цилиндр agg располагались внутри стеклянного цилиндра $ABCD$ диаметром 32,5 см и такой же высоты, по окружности которого на уровне коромысла была наклеена шкала с градусными делениями zQ . Через отверстие m (рис. 22.1) и цилиндр $ABCD$ вводился стержень Φ из шеллака, на конце которого находился бузиновый шарик t , равный по диаметру шарика a .

Кулон в первом мемуаре указал погонную плотность нити весов: $\rho' = 10^{-5}$ кг/м, что соответствует диаметру нити $d = 40$ мкм. Малая величина d не должна вызывать удивления, поскольку технология изготовления очень тонких нитей из благородных металлов была известна ювелирам издавна. Использование столь тонкой нити обеспечивало очень высокую чувствительность весов. По свидетельству Кулона, для закручивания коромысла с плечом $D = 10,83$ см на 360° требовалась сила $F = 1,53 \cdot 10^{-6}$ Н. Это означает, что с учетом неопределенности в установке весов в начальное положение $\Delta\alpha = 3^\circ$ с их помощью могла быть измерена сила $F_{\min} = 1,3 \cdot 10^{-8}$ Н!

Процедура измерений в опытах по проверке закона «обратных квадратов» для сил отталкивания состояла в следующем.

¹ Шеллак — природная смола, вырабатываемая насекомыми, которые паразитируют на некоторых древесных тропических и субтропических растениях. Шеллак и в наши дни используют для пропитки бумаги и картона при изготовлении электроизоляционных материалов.

Закрепленный шарик t и шарик a располагались таким образом, что слегка касались друг друга. При этом шарик a находился против нулевого деления шкалы zQ , нить подвеса была не закручена, а указатель o стоял напротив нулевого деления шкалы p . После этого с помощью специального шарика, укрепленного на изолирующем стержне (рис. 22.4), шарикам t и a сообщался заряд. Поскольку шарики t и a были одного диаметра, то Кулон из соображений симметрии полагал, что заряд между ними распределялся поровну. (Впрочем, в дальнейших рассуждениях Кулон этот факт нигде не использовал.) Возникшее вследствие зарядки отталкивание между шариками приводило к тому, что нить подвеса закручивалась на некоторый угол α_0 , который отсчитывался по шкале zQ . Затем с помощью головки b верхний конец нити закручивался на определенный угол β , контролируемый по шкале P , в сторону, противоположную повороту цилиндра aqg . Увеличение закручивания нити приводило к возрастанию момента упругих сил, что в свою очередь вело к сближению шариков a и t . По шкале zQ отсчитывалось новое угловое положение цилиндра α . Затем головка b поворачивалась на больший угол и отмечалось еще одно положение коромысла.

Поскольку угловое расстояние между шариками не превышало 40° , Кулон считал, что линейное расстояние между ними пропорционально угловому. Ученый проверил, является ли связь между моментом упругих сил M и углом закручивания нити φ линейной. При не слишком больших углах действительно наблюдалась пропорциональность M и φ . Поэтому Кулон заключил, что при определенном равновесном положении коромысла α электростатическая сила, действующая на заряженный шар коромысла и создающая момент, равный по величине и противоположный по направлению моменту упругих сил, может измеряться суммой углов $\alpha + \beta$, т. е. полным углом закручивания нити. Тогда для проверки закона «обратных квадратов» следует сравнивать отношения $(\alpha + \beta)/\alpha_0$ (характеристику силы) и $(\alpha/\alpha_0)^2$ (характеристику расстояния). В таблице 1 представлены результаты измерений из первого мемуара Кулона.

Таблица 1

α	β	$\alpha + \beta$	$(\alpha + \beta)/\alpha_0$	$(\alpha_0/\alpha)^2$
36	0	36	1	1
18	126	144	4	4
8,5	567	575,5	16	17,9

Из таблицы видно, что соответствующие отношения оказываются практически равными (расхождение для третьего

случая составляет 12%). В итоге ученый формулирует фундаментальный закон электричества:

«Сила отталкивания двух маленьких шариков, наэлектризованных электричеством одной природы (одного знака.— С. Ф.), обратно пропорциональна квадрату расстояния между центрами шариков».

Интересны и «Замечания» Кулона, следующие за изложением результатов, в которых обсуждаются детали опыта и влияние различных факторов на его результат. Ученый указывал, что точность установки весов в начальное положение составляет $\Delta\alpha = 2 \div 3^\circ$, причем основной помехой для более точной установки весов является движение воздуха. Погрешность в 12% представляется лежащей в пределах точности измерений, поскольку $\Delta\alpha/\alpha_{\min} = 35\%$. Далее Кулон предупреждает, что, с одной стороны, цилиндр aqg не должен быть слишком тяжелым, поскольку значительное натяжение нити влияет на ее свойства по отношению к кручению, а с другой — он не может быть сделан очень легким, так как в этом случае нить не будет прямой.

В первом мемуаре Кулон не дал полного решения проблемы. Как и его предшественники, Пристли и Кавендиш, Кулон поначалу исследовал силу отталкивания и лишь затем перешел к изучению притяжения. Для этого ему пришлось изменить методику измерений. Причина отказа Кулона от уже проверенной методики связана с тем, что в ходе опыта не удавалось избежать касания разноименно заряженных шариков: поворот головки b для измерения равновесного расстояния между шариками приводит к возникновению колебаний, в ходе которых и происходит касание, даже если равновесное расстояние между шариками достаточно велико.

Способ исследования сил притяжения, предложенный Кулоном и описанный им в следующем мемуаре, сводится к измерению периода колебаний цилиндра lcg (рис. 23), на одном конце которого закреплен заряженный диск из позолоченной бумаги l . Колебания цилиндра возникали под действием электрического поля, которое создавалось зарядом противоположного знака заряду диска, находившимся на медном шаре G . Этот шар располагался на изолирующих опорах так, что его горизонтальный диаметр оказывался на одном уровне с центром диска. Расстояние между диском l и шаром

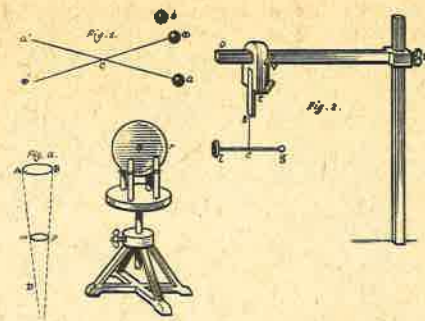


Рис. 23. Схема установки Кулона для исследования сил электростатического притяжения.

G регулировалось путем перемещения муфты V вдоль консоли O . Цилиндр подвешивался на шелковой нити длиной 1,8 см, столь тонкой, что при небольших амплитудах колебаний крутильным моментом можно пренебречь. Таким образом, Кулон очень тонко использовал знание упругих свойств нитей относительно кручения: первый метод основан на использовании этих свойств, а второй — на возможности пренебречь упругостью нити.

Кулон проводил измерения для трех расстояний d между центрами шара и диска. Он считал, что поле, создаваемое зарядом, находящимся на шаре G (диаметр 32,5 см), эквивалентно полю точечного заряда, помещенного в центре шара. Однако поскольку диаметр диска l (2 см) много меньше, чем расстояния d между его центром и центром шара, и амплитуда колебаний мала, то, пользуясь современной терминологией, поле в области пространства, где происходят колебания диска, можно считать однородным. Тогда колебания заряженного диска можно уподобить колебаниям математического маятника, происходящим в поле тяжести Земли. Как известно, период колебаний математического маятника T_m обратно пропорционален квадратному корню из ускорения свободного падения. Это соотношение в принципе можно записать в виде $T_m \sim (mg)^{-1/2}$. По аналогии период колебания T заряженного диска в опыте Кулона должен быть обратно пропорционален квадратному корню из силы F , действующей на диск со стороны шара:

$$T \sim F^{-1/2}.$$

Тогда если электростатическая сила притяжения $F \sim d^{-2}$, то $T \sim d$.

В таблице 2 приведены результаты экспериментов Кулона.

Таблица 2

d , см	Длительность 7,5 колебаний, с	d/d_1	T/T_1
24,36	20	1	1
48,72	40	2	2
64,97	60	2,67	3

Из таблицы 2 видно, что данные первых двух измерений подтверждают предположение о пропорциональности T и d . Отклонение от этой зависимости для третьего измерения Кулон связывал с утечкой заряда, которая здесь существенна, поскольку для проведения трех измерений, по словам Кулона, требуется около четырех минут. Введение соответствующей поправки, о которой упоминалось уже в первом мемуаре,

позволило уменьшить расхождение между расчетом и данными эксперимента вдвое.

Следует сказать о том, что Кулон принимал как очевидный тот факт, что сила электрического взаимодействия пропорциональна произведению «электрических масс» (т. е. электрических зарядов), и не пытался обосновать это утверждение с помощью опыта. В последующих мемуарах, посвященных электрическим исследованиям, Кулон уже непосредственно использовал это утверждение. Правда, в замечаниях, которыми он сопроводил свой мемуар, можно найти упоминания о так называемом «методе деления заряда», позволяющем проверить пропорциональность силы произведению зарядов. Суть этого метода состоит в следующем. Пусть сначала шарам крутильных весов сообщаются произвольные заряды q_1 и q_2 и определяется сила взаимодействия между шарами. Затем неподвижного шара весов, имеющего заряд q_1 , касаются точно таким же незаряженным шаром. Вследствие соприкосновения заряд q_1 распределяется поровну между двумя шарами: этого следует ожидать из соображений симметрии. После этого вновь измеряют силу взаимодействия между шарами крутильных весов, которые теперь обладают зарядами $q_1/2$ и q_2 . Эту процедуру можно повторить несколько раз. Если последовательно измеренные силы F_1, F_2, F_3, \dots образуют отношение $1:1/2:1/4:\dots$, то это означает, что сила взаимодействия действительно пропорциональна величинам зарядов. Тот факт, что Кулон специально не описывает соответствующие опыты, по-видимому, свидетельствует о глубокой вере ученого в аналогию между гравитационным и электростатическим взаимодействиями.

Кулон был удовлетворен полученными результатами. Он использовал метод колебаний и для изучения сил отталкивания и получил еще одно подтверждение закона «обратных квадратов»¹. Таким образом, работу по определению зависимости сил электрического притяжения и отталкивания от расстояния Кулон мог считать законченной. Ученый занялся исследованием различных электрических явлений.

Еще в первом мемуаре Кулон обратил внимание на явление утечки электрического заряда, или, говоря его словами, уменьшение электрической плотности. В третьем мемуаре он подробно исследует это явление. Здесь Кулон проявил большую научную смелость. Дело в том, что явление утечки заряда обусловлено множеством причин, разобраться в которых без понимания природы электричества и знаний о строении вещества кажется практически невозможным. Тем не менее и на этот раз Кулон сумел провести довольно точные опыты и высказать ряд правдоподобных гипотез.

¹ При этом, однако, Кулон подчеркивал преимущества метода, основанного на использовании крутильных весов.

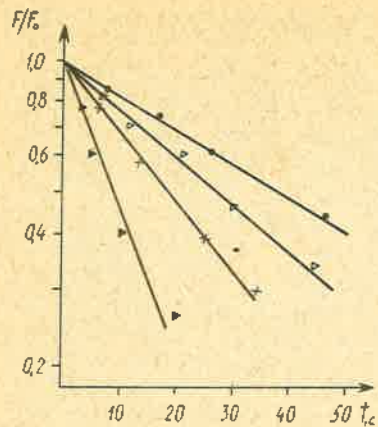


Рис. 24. Зависимость заряда на шаре крутильных весов от времени (по данным Кулона).

Основным результатом Кулона было установление экспоненциального закона убывания заряда с течением времени:

$$q(t) = q_0 e^{-t/\tau},$$

где q_0 — заряд шара в начальный момент времени ($t=0$), τ — постоянная, зависящая от условий проведения опыта. Эта зависимость была получена Кулоном сначала теоретически, а затем подтверждена экспериментально. На рисунке 24 представлены результаты опытов Кулона. На графике по оси абсцисс отложено время t , а по оси ординат в логарифмическом масштабе отношение сил взаимодействия между шарами крутильных весов в момент

времени t при $t=0$. Видно, что экспериментальные данные хорошо укладываются на прямые, что является свидетельством в пользу предложенного Кулоном закона. Различие наклона прямых, т. е. различие в величинах τ , обусловлено изменением погодных условий при проведении четырех серий опытов.

Кулон связывал утечку зарядов с двумя причинами. Первая состояла в наличии в воздухе частиц, которые при соприкосновении с заряженным телом принимают на себя часть его заряда, а затем этим телом отталкиваются и уносят приобретенное электричество. Ученый писал, что «более быстрое или более медленное убывание электричества зависит от количества влаги или от числа проводящих частиц, которые находятся в одном и том же объеме воздуха... при той же самой степени влажности в теплые дни электричество должно быстрее исчезать, чем в холодные». Обнаруженное Кулоном различие в скорости утечки электричества в дни, когда температура и влажность воздуха были равны, свидетельствует о том, что он, возможно, впервые наблюдал влияние космического излучения на ионизацию воздуха.

Вторая причина утечки электричества, на которую указал Кулон, — это несовершенство изоляционных материалов. В изучении этого вопроса ученый не добился больших результатов вследствие встретившихся экспериментальных трудностей. Однако с современной точки зрения его мысль о том, что идеальных изоляторов в природе не существует, представляется совершенно правильной.

В следующем, одном из самых коротких мемуаров серии Кулон рассмотрел вопрос о характере распределения элек-

тричества между телами. Он доказал, что «электрический флюид распространяется во всех телах в соответствии с их формой» и что, пользуясь современной терминологией, конечное распределение заряда не зависит от химической природы тел. При этом, однако, Кулон отметил, что если перераспределение заряда между соприкасающимися проводящими телами происходит очень быстро, практически мгновенно, то в случае, когда одно из тел является несовершенным проводником (изолятором), для перераспределения заряда требуется значительное время. В этой же работе ученый экспериментально доказал, что заряд, сообщенный проводящему телу, распределяется только по поверхности тела

и не попадает внутрь его. Эта закономерность, как теперь хорошо известно, является непосредственным следствием закона «обратных квадратов» и используется для решения многих задач электростатики. Самому Кулону, однако, не удалось в полной мере обосновать это явление теоретически.

Пятый и шестой мемуары посвящены количественному анализу распределения заряда между соприкасающимися проводящими телами и определению плотности заряда на различных участках поверхности этих тел (рис. 25). Ученый рассматривает соприкасающиеся шары, отношение диаметров которых варьируется в довольно широких пределах, изучает случай касания шара и цилиндра, распределение заряда по системе, состоящей из большого числа шаров (рис. 26). В шестом мемуаре Кулон исследовал также «электрическое состояние различных частей неэлектризованного тела, поднесенного к наэлектризованному телу на некоторое расстояние, достаточно большое, чтобы электричество последнего не могло бы передаваться неэлектризованному телу через слой воздуха, их разделяющий» (рис. 27). Расчеты Кулона, с помощью которых он пытался анализировать полученные данные, были основаны на приближенных методах. И хотя в ряде случаев

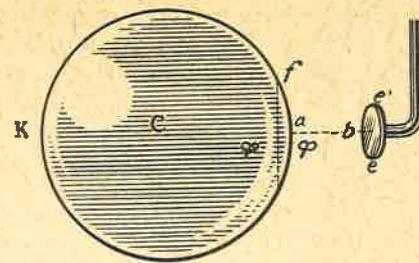


Рис. 25. Метод определения плотности поверхностного заряда с помощью малого пробного тела (диска), использованный Кулоном.

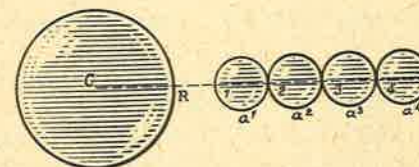


Рис. 26. Одна из конфигураций шаров, в которой Кулон исследовал распределение электрического заряда.

их результаты оказываются близкими к точным решениям, известным в настоящее время, не они представляют наибольшую ценность для дальнейшего прогресса науки об электричестве. Главным в работах Кулона были экспериментальные результаты. Рассмотрение конфигураций из большого числа шаров вовсе не прихоть ученого-чудака. Дело в том, что с помощью множества малых шаров можно смоделировать сколь угодно сложное тело. Удивительно точные результаты, полученные Кулоном, стали «пробным камнем» для математической теории электростатического потенциала, построенной в 1811 г. французским ученым С. Пуассоном (1781—1840).

Кулон всячески старался излагать свои результаты без ссылки на какие-либо воззрения о природе электричества. Но не коснуться этого вопроса он не смог. Так, в пятом мемуаре, анализируя распределение электричества между проводящими шарами, Кулон приходит к выводу, что «вокруг этих тел не образуется достаточно протяженной атмосферы, как думает большинство авторов». Однако он отказывается и от унитарной теории Франклина — Эпинуса: «Легко понять, что предположение Эпинуса дает при вычислении тот же результат, что и гипотеза двух флюидов. Я предпочитаю эту гипотезу, которая уже предлагалась несколькими физиками, поскольку мне кажется противоречивым принимать одновременно в частях тел силу притяжения, обратно пропорциональную квадрату расстояния, и силу отталкивания, также обратно пропорциональную квадрату расстояния; силу, которая непременно будет бесконечно большой по отношению к силе притяжения, следствием которой является тяжесть». Это мнение Кулона согласуется с хорошо известным в наши дни фактом, что сила гравитационного взаимодействия между такими заряженными частицами, как электроны и позитроны, на много порядков меньше сил электростатического взаимодействия между ними¹. Однако Кулон понимал, что и дуалистическая теория электрической жидкости всего лишь гипотеза. Его позиция отчетливо отразилась в следующем высказывании: «Какова бы ни была причина электричества, все явления будут объяснены и расчет окажется соответствующим

¹ Это показывает элементарный расчет. Сила гравитации определяется законом всемирного тяготения $F_{гп} = G \frac{m_e^2}{r^2}$, электростатическая сила — законом Кулона $F_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$. Следовательно, их отношение равно $F_{гп}/F_e = \frac{4\pi\epsilon_0 G m_e^2}{e^2}$. Если подставить значения величин в полученную формулу, то окажется, что $F_{гп}/F_e \approx 2 \cdot 10^{-44}$

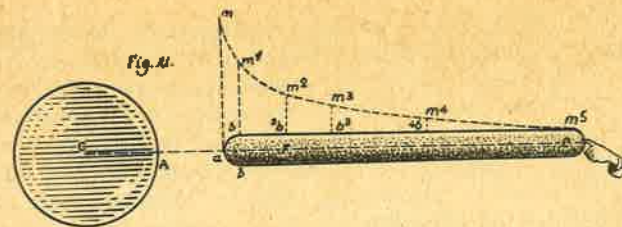


Рис. 27. Схема опыта Кулона по исследованию распределения зарядов на изолированном теле, находящемся в поле заряженного шара.

результатам опытов, если предположить, что существуют две электрические жидкости, и считать, что части одной и той же жидкости отталкивают друг друга обратно пропорционально квадрату расстояния и притягивают части другой жидкости также обратно пропорционально квадрату расстояния».

Ученый чувствовал, что для выяснения природы электрического взаимодействия еще не пришло время и что его задача состоит в том, чтобы «представить, пользуясь наименьшим возможным числом постулатов, результаты расчетов и опытов, а не указать действительные причины электричества». С этой задачей Кулон справился.

Рассказывая об использовании крутильных весов для физических исследований, мы пока ни разу не коснулись исследований Кулона в области магнетизма. Между тем описание экспериментов с постоянными магнитами составляет существенную часть второго мемуара и практически весь седьмой мемуар серии. Применительно к магнетизму Кулон пытался решить те же задачи, что и для электричества. При этом он основывался на аналогии между взаимодействием намагнизованных и намагниченных тел. Ученый писал: «Так как магнитные тела действуют друг на друга при конечных расстояниях с силами притяжения или отталкивания, точно так же как электрические тела, то представляется, что магнитный флюид, если не по своей природе, то по крайней мере в этом свойстве, должен быть аналогичен электрическому флюиду; и согласно этой аналогии можно предположить, что оба флюида действуют по одним и тем же законам...»

Методы, с помощью которых Кулон изучал магнитное взаимодействие, также аналогичны методам, примененным им при исследовании электричества. В первом методе сила взаимодействия между неподвижным намагниченным стержнем и горизонтальной подвижной магнитной стрелкой определялась по измерению периода колебания стрелки. Второй метод был основан на использовании крутильных весов.

конструкция которых, правда, несколько отличалась от конструкции «электрических весов»: «магнитные весы» имели значительно большие размеры, поскольку на нити крутильного подвеса требовалось укреплять стрелки длиной до 68 см.

По сравнению с опытами по электричеству при постановке экспериментов с намагниченными телами перед Кулоном возникло несколько дополнительных трудностей. Прежде всего требовалось корректно учесть влияние магнитного поля Земли на результаты опытов. Эту трудность Кулон сумел преодолеть. Гораздо серьезней были две взаимосвязанные проблемы: как реализовать точечный «магнитный заряд» (иначе говоря, изолированный магнитный полюс) и по отношению к каким точкам взаимодействующих намагниченных тел следует отсчитывать расстояние между ними? Строго говоря, эти проблемы не имеют точного решения, поскольку в природе до сих пор не обнаружен магнитный монополюс, т. е. изолированный магнитный полюс. Однако с некоторым приближением точечным магнитным полюсом можно считать конец длинной намагниченной стрелки. Это было доказано Кулоном с помощью специальных опытов. Во втором мемуаре он писал:

«Три проведенных эксперимента показывают, что центр действия каждой половины стержня находится на очень малом расстоянии от его конца. При длине стержня 68 см не следует опасаться заметной ошибки, считая, что весь магнитный флюид сконцентрирован на расстоянии 5,4 или 8,1 см [от конца стержня]».

Таким образом, отнеся «центр магнитных масс» к концу стержня, Кулон получил возможность отсчитывать расстояния между намагниченными телами и, значит, установить закон магнитного взаимодействия:

«Притягивающее и отталкивательное действие магнитного флюида пропорционально его плотности и обратно пропорционально квадрату расстояния его молекул».

Этот закон также называют иногда законом Кулона. Следует, однако, подчеркнуть, что он не является столь фундаментальным, как основной закон электростатики, и область его применения сильно ограничена.

Кроме установления закона взаимодействия магнитных полюсов, Кулон либо обнаружил, либо подтвердил и изучил количественно много фактов, касающихся свойств намагниченных тел и магнитных материалов. В частности, он исследовал, говоря современным языком, распределение магнитного поля вдоль длинных и коротких намагниченных стержней, зависимость магнитных свойств железа и стали от температуры и характера механической обработки. В последнем случае он пришел к правильному выводу о том, что магнитные свойства железа зависят от его тепловой и механической предистории

и что практически невозможно получить два образца стали с идентичными магнитными характеристиками.

В своих работах Кулон касался и вопроса о природе магнетизма. Так, для объяснения широко известного факта, что при делении полосового магнита на части невозможно разделить северный и южный полюса, он привлек представление о распределении магнитного флюида между молекулами:

«Я полагаю, что можно было бы согласовать результаты опытов с расчетом, внося некоторые изменения в гипотезу (о магнитном флюиде. — С. Ф.)... Суть состоит в том, что в рамках системы Эпинуса¹ предполагается, что магнитный флюид заключен в каждой молекуле или в каждой составной части магнита или стали; что флюид можно перемещать с одного конца этой молекулы на другой, создавая тем самым у каждой молекулы два полюса; однако этот флюид не может переходить от одной молекулы к другой. Таким образом, например, если одна намагниченная стрелка (рис. 28) имеет очень малый диаметр или если каждая молекула может рассматриваться как малая стрелка, северный конец которой соединен с южным концом предыдущей, то у этой стрелки будут иметься лишь два конца *n* и *s*, которые проявят признаки магнетизма... Если похожую стрелку после намагничения разрезать на две части в точке *a*, то, например, конец *a* части *na* будет иметь ту же силу, что имел конец *s* целой стрелки, а конец *a* части *sa* аналогично будет иметь ту же силу, какую имел конец *n* стрелки до ее разрезания».

Как мы видим, Кулону удалось уловить некоторые своеобразные черты магнетизма. В целом, однако, как уже говорилось, общность полученных Кулоном результатов в области магнетизма гораздо меньше, чем общность закономерностей, установленных для электричества. Причина этого состоит в сложности магнитных явлений вообще и в особенности физики процессов, протекающих в ферромагнетиках; основные закономерности этих процессов были поняты лишь в XX в., после создания квантовой теории твердого тела.

Кулон, видимо, и сам не был полностью удовлетворен своими магнитными исследованиями. Возможно, в связи с этим он и после 1789 г. (времени публикации седьмого мемуара серии) не раз обращался к проблемам магнетизма. Правда, эти более поздние работы имеют главным образом прикладной характер, о чем свидетельствуют их названия: «Теоретиче-

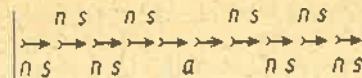


Рис. 28. К объяснению Кулоном магнитных свойств железа.

¹ Т. е. допуская существование магнитного флюида (специальной неведомой жидкости).

ское и экспериментальное определение сил, которые возвращают в плоскость магнитного меридиана различные стрелки, намагниченные до насыщения» (1799 г.), «Исследования, относящиеся к действию, производимому магнитами на все тела» (1802 г.), «Новый метод определения наклона магнитной стрелки» (1803 г.), «Результат различных методов, применяемых для сообщения стальным пластинкам и стержням наибольшей степени магнетизма» (1806 г.).

Таким образом, Кулон заложил основы электро- и магнито-статике. Им были получены экспериментальные результаты, имеющие как фундаментальное, так и прикладное значение. Для истории физики его эксперименты с крутильными весами имели важнейшее значение еще и потому, что они дали в руки физиков метод определения единицы электрического заряда через величины, использовавшиеся в механике: силу и расстояние, что позволило проводить количественные исследования электрических явлений. В этом состоит особая роль метода крутильных весов Кулона в сравнении с «нулевым» методом Кавендиша.

Не будем, однако, забывать, что методы, которыми пользовался Кулон, занимаясь экспериментами в области электричества и магнетизма, были для конца XVIII в. поистине новаторскими. Из-за этого далеко не все ученые сразу восприняли его результаты как фундаментальные. Некоторые, отдавая дань экспериментальному мастерству Кулона, высказывались о полученных им данных как о сугубо частных проявлениях электрических взаимодействий. Ситуация обострялась еще и тем, что даже спустя несколько десятилетий повысить точность проверки закона «обратных квадратов» для электрических взаимодействий по методу Кулона не удалось...

Признание к закону Кулона приходило постепенно. Большую роль здесь сыграло теоретическое исследование Пуассона, о котором уже говорилось: тот факт, что распределение заряда по поверхности проводника, рассчитанное на основе закона Кулона, хорошо согласовывалось с данными опыта, было хотя и косвенным, но все же веским аргументом в пользу закона «обратных квадратов».

Соотношение, установленное Кулоном для взаимодействия «магнитных полюсов», вновь привлекло внимание ученых после открытия Х. Эрстедом (1777—1851) действия электрического тока на магнитную стрелку (1820 г.). Стало ясно, что полная теория магнитных взаимодействий должна была включить закон Кулона как составную часть. Соотечественник Кулона, физик и математик А. Ампер (1775—1836), создавший первый вариант электродинамики — науки о движении электричества, во введении к сочинению «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта» отмечал, что «имел в виду показать, что результаты вычислений полностью под-

тверждаются ... согласием, в котором эти результаты находятся с законами, выведенными Кулоном и г. Био из их опытов, первым — относительно взаимодействия двух магнитов, вторым — для взаимодействия магнита и тока».

Немаловажную роль сыграло введение единицы заряда (чему, как мы видели, способствовали открытия Кулона) в установлении английским ученым М. Фарадеем (1791—1867) законов электролиза. Но Фарадей пользовался не только следствиями открытий Кулона. В исследованиях явления электростатической индукции Фарадей непосредственно применял и крутильные весы. Он писал: «В качестве измерительного прибора я пользовался крутильным электрометром — весами Кулона; прибор был построен в основном согласно указаниям Кулона, но с некоторыми изменениями и добавлениями...¹ Чтобы освоиться с крутильным электрометром — весами Кулона, необходим опыт; но я считаю его весьма ценным прибором в руках того, кто решится на труд изучить путем упражнения и внимательного отношения необходимые при пользовании им предосторожности».

Закон Кулона для электростатических взаимодействий в середине XIX в. включался в различные варианты электродинамических теорий, в рамках которых физики пытались учесть множество новых фактов и закономерностей, обнаруженных к тому времени. Одним из таких вариантов была теория немецкого физика В. Вебера (1804—1891), в основное уравнение которой входила константа, равная отношению электростатической и электромагнитной единиц заряда и имеющая размерность скорости. Эксперимент по определению этой константы, проведенный Вебером совместно с другим немецким физиком — Р. Кольраушем (1809—1858), стал важной вехой в истории физики: оказалось, что константа Вебера по величине близка к скорости света, что указывало на связь электромагнетизма и оптики. Так неожиданно анализ взаимосвязи между единицами, одна из которых была введена благодаря установлению закона Кулона, дал физикам ключ к новым, принципиально важным обобщениям. Опыт Вебера и Кольрауша имел важное значение для создания Дж. Максвеллом классической электродинамики (1864 г.). Следует подчеркнуть, что эмпирический закон Кулона для электростатических взаимодействий нашел отражение и в этой важнейшей физической теории.

¹ Одно из существенных изменений Фарадея состояло в том, что металлическая нить заменялась стеклянной.

ское и экспериментальное определение сил, которые возвращают в плоскость магнитного меридиана различные стрелки, намагниченные до насыщения» (1799 г.), «Исследования, относящиеся к действию, производимому магнитами на все тела» (1802 г.), «Новый метод определения наклона магнитной стрелки» (1803 г.), «Результат различных методов, применяемых для сообщения стальным пластинкам и стержням наибольшей степени магнетизма» (1806 г.).

Таким образом, Кулон заложил основы электро- и магнито-статике. Им были получены экспериментальные результаты, имеющие как фундаментальное, так и прикладное значение. Для истории физики его эксперименты с крутильными весами имели важнейшее значение еще и потому, что они дали в руки физиков метод определения единицы электрического заряда через величины, использовавшиеся в механике: силу и расстояние, что позволило проводить количественные исследования электрических явлений. В этом состоит особая роль метода крутильных весов Кулона в сравнении с «нулевым» методом Кавендиша.

Не будем, однако, забывать, что методы, которыми пользовался Кулон, занимаясь экспериментами в области электричества и магнетизма, были для конца XVIII в. поистине новаторскими. Из-за этого далеко не все ученые сразу восприняли его результаты как фундаментальные. Некоторые, отдавая дань экспериментальному мастерству Кулона, высказывались о полученных им данных как о сугубо частных проявлениях электрических взаимодействий. Ситуация обострялась еще и тем, что даже спустя несколько десятилетий повысить точность проверки закона «обратных квадратов» для электрических взаимодействий по методу Кулона не удалось...

Признание к закону Кулона приходило постепенно. Большую роль здесь сыграло теоретическое исследование Пуассона, о котором уже говорилось: тот факт, что распределение заряда по поверхности проводника, рассчитанное на основе закона Кулона, хорошо согласовывалось с данными опыта, было хотя и косвенным, но все же веским аргументом в пользу закона «обратных квадратов».

Соотношение, установленное Кулоном для взаимодействия «магнитных полюсов», вновь привлекло внимание ученых после открытия Х. Эрстедом (1777—1851) действия электрического тока на магнитную стрелку (1820 г.). Стало ясно, что полная теория магнитных взаимодействий должна была включить закон Кулона как составную часть. Соотечественник Кулона, физик и математик А. Ампер (1775—1836), создавший первый вариант электродинамики — науки о движении электричества, во введении к сочинению «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта» отмечал, что «имел в виду показать, что результаты вычислений полностью под-

тверждаются ... согласим, в котором эти результаты найдутся с законами, выведенными Кулоном и г. Био из их опытов, первым — относительно взаимодействия двух магнитов, вторым — для взаимодействия магнита и тока».

Немаловажную роль сыграло введение единицы заряда (чему, как мы видели, способствовали открытия Кулона) в установлении английским ученым М. Фарадеем (1791—1867) законов электролиза. Но Фарадей пользовался не только следствиями открытий Кулона. В исследованиях явления электростатической индукции Фарадей непосредственно применял и крутильные весы. Он писал: «В качестве измерительного прибора я пользовался крутильным электрометром — весами Кулона; прибор был построен в основном согласно указаниям Кулона, но с некоторыми изменениями и добавлениями...¹ Чтобы освоиться с крутильным электрометром — весами Кулона, необходим опыт; но я считаю его весьма ценным прибором в руках того, кто решится на труд изучить путем упражнения и внимательного отношения необходимые при пользовании им предосторожности».

Закон Кулона для электростатических взаимодействий в середине XIX в. включался в различные варианты электродинамических теорий, в рамках которых физики пытались учесть множество новых фактов и закономерностей, обнаруженных к тому времени. Одним из таких вариантов была теория немецкого физика В. Вебера (1804—1891), в основное уравнение которой входила константа, равная отношению электростатической и электромагнитной единиц заряда и имеющая размерность скорости. Эксперимент по определению этой константы, проведенный Вебером совместно с другим немецким физиком — Р. Кольраушем (1809—1858), стал важной вехой в истории физики: оказалось, что константа Вебера по величине близка к скорости света, что указывало на связь электромагнетизма и оптики. Так неожиданно анализ взаимосвязи между единицами, одна из которых была введена благодаря установлению закона Кулона, дал физикам ключ к новым, принципиально важным обобщениям. Опыт Вебера и Кольрауша имел важное значение для создания Дж. Максвеллом классической электродинамики (1864 г.). Следует подчеркнуть, что эмпирический закон Кулона для электростатических взаимодействий нашел отражение и в этой важнейшей физической теории.

¹ Одно из существенных изменений Фарадея состояло в том, что металлическая нить заменялась стеклянной.

РЕВОЛЮЦИЯ. ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ

Последний мемуар Кулона из серии по электричеству и магнетизму был представлен в Парижскую академию наук в 1789 г. Этот же год в истории Франции ознаменовал конец эпохи абсолютной монархии. В 1789 г. началась Великая французская буржуазная революция, в корне изменившая весь уклад жизни французского общества и оказавшая сильнейшее влияние на социальные движения в других странах.

Революционные события нашли отражение и в жизни Кулона. В 1790—1791 гг. в несколько этапов происходила реорганизация Военно-инженерного корпуса. Нововведения касались многих сторон деятельности этого подразделения французской армии — от уменьшения общей численности военных инженеров до изменения порядка прохождения службы. В частности, офицерам старшего возраста было предоставлено право уйти в отставку. Кулон, который к тому времени уже более тридцати лет находился на военной службе и имел чин майора (с 1786 г.), воспользовался этим обстоятельством и в декабре 1790 г. подал прошение об отставке. В апреле следующего года его прошение было удовлетворено, и он начал получать пенсию в размере 2240 ливров в год, которая, правда, через несколько лет была значительно уменьшена. Примерно в это же время Кулон лишился должности интенданта вод и фонтанов короля. Таким образом, работа Кулона в Парижской академии наук стала не только основным, но и единственным занятием ученого.

В первые годы революции характер деятельности академии изменился не очень сильно. По-прежнему на ее заседаниях рассматривались представленные академиками научные работы, а также изобретения и проекты, переданные в академию на заключение.

Одним из мероприятий академии, реализация которого стала возможной только после революции и в котором принял участие Кулон, было создание новой системы мер и весов. До революции во Франции не существовало единой системы мер. С различием в мерах можно было столкнуться не только в разных провинциях, но даже в одном городе, поселке или селении. Мало того, что использовались меры, отличавшиеся названиями, но и под одним названием часто фигурировали различные по величине меры. Так, например, пять названий для единиц измерения площади поверхности земли обозначали 43 (!) разные меры. Такое положение отрицательно сказывалось на торговле, затрудняло развитие промышленности, способствовало различного рода спекуляциям. Не случайно

поэтому в «наказах», выдвинутых в 1789 г., требование единых меры и веса стояло рядом с требованием единого для всей Франции закона.

Одной из важнейших проблем в этой области был выбор естественного (т. е. не связанного с каким-то произвольно определенным объектом) эталона длины. В XVIII в. наибольшей популярностью пользовались два предложения. Одно состояло в выборе единицы длины как определенной части дуги земного меридиана. Второе предложение основывалось на зависимости периода колебания маятника от его длины: эталон длины предполагалось связать с длиной маятника, колеблющегося на определенной широте с периодом, равным одной секунде («секундный маятник»). Руководство Парижской академии наук хорошо понимало сложность задачи создания единой и естественной системы мер, поэтому во временную комиссию академии, которой было поручено подготовить предложения по этому вопросу, вошли такие известные ученые, как Ж. Борда, Ж. Лагранж, П. Лаплас, Г. Монж и Ж. Кондорсе. Однако эта комиссия, созданная в 1788 г., не продвинулась в решении проблемы. Условия, прежде всего социальные, для выработки единой системы мер и весов возникли лишь после революции 1789 г.

В марте 1791 г. временная комиссия представила академии и Национальному собранию свои предложения, на основе которых были назначены пять комиссий для проведения исследований с целью создания новой системы мер. Целью комиссий было:

- 1) проведение триангуляционных работ и измерений широты;
- 2) измерение стандартов длины;
- 3) определение длины секундного маятника;
- 4) определение массы стандартного объема воды;
- 5) сравнение провинциальных и парижских мер.

В состав третьей комиссии вошел Кулон. Исследования по определению длины секундного маятника велись довольно активно, и в ноябре 1792 г. Борда в докладе Конвенту сообщил:

«Работы, касающиеся длины [секундного] маятника, составляющие задачу третьей комиссии, уже сильно продвинулись; многочисленные опыты с целью определения прежде всего длины секундного маятника в Париже уже проведены в обсерватории гражданами Борда, Кулоном и Кассини».

Однако по мере развития революционного процесса политические события все сильнее сказывались на деятельности Парижской академии наук в целом и на работе по созданию новой системы мер и весов в частности. Особенно остро вопрос об Академии наук встал после прихода к власти якобинцев в июне 1793 г. Если раньше в адрес академии и ее членов звучала лишь весьма острая критика (одним из наиболее

активных критиков был выдающийся революционер Ж. Марат), то вслед за установлением якобинской диктатуры противники академии перешли к решительным действиям. Когда 17 августа 1793 г. академики пришли на очередное заседание, помещения Лувра, где они обычно работали, оказались опечатанными. Выяснилось, что таким образом Директория Парижского департамента провела в жизнь решение Конвента от 8 августа о роспуске академии.

Решение Конвента было обусловлено несколькими причинами. Академия наук представляла собой учреждение, созданное еще при королевской власти, и в своей структуре и деятельности отражала пережитки старой эпохи. Многие исследования, проводившиеся академией, были далеки от насущных потребностей революции. Следует отметить, что некоторые академики бежали из Франции, а среди оставшихся было немало лиц с контрреволюционными взглядами. Поэтому решение Конвента имело некоторые основания. При этом, однако, необходимо иметь в виду, что ряд академиков на протяжении всей революции активно поддерживали новую власть и принимали участие в организации обороны страны¹.

Конвент понимал, что в сложной обстановке, в которой находилась Франция, помощь ученых все же необходима. Поэтому уже после роспуска академии в сентябре 1793 г. была создана новая временная комиссия для продолжения исследований по мерам и весам. В нее вошли и бывшие академики, такие, как Лагранж, Кассини, Лаплас, Лавуазье, Монж и другие. Был включен в состав временной комиссии и Кулон. В декабре того же года он даже заменил Лавуазье на посту казначея комиссии. Однако серьезных результатов комиссия получить не смогла: 23 декабря 1793 г. многие ученые были выведены из ее состава и среди них Борда, Лавуазье, Лаплас и Кулон. Комитет общественного спасения — руководящий орган якобинской диктатуры — считал, что они не заслуживают «доверия по недостатку республиканской доблести и ненависти к королям». Этот акт привел к фактическому прекращению работ по созданию новой системы мер и весов; они были возобновлены лишь в 1795 г.

К концу 1793 г. политическая обстановка в Париже еще более обострилась. Комитет общественного спасения вел решительную, а подчас и жестокую борьбу с контрреволюцией. В нее оказались вовлеченными и некоторые ученые.

Кулон, бывший офицер королевской армии, тесно связанный с академиками, подвергшимся гонениям, не мог не понимать, что оставаться в Париже опасно. Поэтому он еще

¹ Эта сторона деятельности французских ученых подробно рассмотрена в книге В. Демьянова «Геометрия и Марсельеза» (М.: Знание, 1979), посвященной выдающемуся французскому математику Г. Монжу.

до роспуска академии переехал в сельскую местность севернее Парижа, где ему принадлежало небольшое поместье. Он изредка приезжал в столицу для участия в работе временной комиссии по мерам и весам.

После изгнания из состава временной комиссии Кулон решил перебраться подальше от Парижа. Он вместе с семьей¹ и своим старым другом и коллегой по академии Борда переезжает в свое поместье близ Блуа. Здесь ученый проводит почти полтора года, спасаясь от политических бурь.

Для Кулона месяцы, проведенные вдали от Парижа, стали началом спада научной активности. К моменту переезда в Блуа ученому было уже пятьдесят семь лет. Его здоровье, расшатанное службой на Мартинике, с годами становилось все слабее и слабее. Кроме того, в сельской глуши Кулон, мастер тонкого количественного эксперимента, оказался оторванным от своих инструментов и приборов и, естественно, не мог продолжать начатые в Париже опыты.

Однако привычка к научным занятиям брала свое. Даже в крайне неблагоприятных для научной работы условиях Кулон сумел выполнить два интересных исследования, результаты которых после возвращения в Париж он представил в виде мемуаров. Один из них явился продолжением изысканий Кулона в области биомеханики человека, занимавших его в начале научной карьеры. Он назывался «Результаты нескольких экспериментов, поставленных для определения действия, которое могут произвести люди за день работы при различных способах приложения их сил». Действие, производимое человеком, Кулон оценивал с помощью величины, сходной с механической работой, равной произведению силы на расстояние, пройденное телом под действием этой силы. На основе проведенных опытов ученый пришел к выводу, что способность человека производить механическую работу не может определяться посредством кратковременных испытаний, поскольку при выполнении работы в течение длительного времени на величине произведенного действия сказывается утомление. При этом оказалось, что эффективность труда зависит от вида работы. Сравнивая работу по передвижению собственного тела человека и груза по горизонтальной плоскости, по вертикали, вращение ворота и т. д., Кулон заключил, что утомление сильнее сказывается на общих итогах дневного труда в случае более тяжелых работ. Кулон считал, что тяжелую физическую работу человек может эффективно выполнять в течение восьми, а более легкую — в течение

¹ Когда именно Кулон стал семейным человеком, неясно. Известно лишь, что жена ученого Луиза Франсуаза, урожденная Дезормо, была значительно моложе его. Официально их брак был зарегистрирован лишь в 1802 г., хотя первый сын Кулона, названный в честь отца Шарлем Огюстеном, родился в 1790 г. Второй сын, Анри Луи, родился в 1797 г.

десяти часов. Для конца XVIII в., когда рабочий день зачастую длился более четырнадцати часов, это весьма важный вывод.

Второй цикл исследований Кулона, начатый им в Блуа, относится к новой для него области: он изучал циркуляцию сока в деревьях. Спиливая деревья целиком и выделяя отдельные части ствола, ученый пытался определить область, по которой происходит движение основной массы соков. Вопросом о циркуляции древесных соков Кулон интересовался и после возвращения в Париж. Его исследования в этой области обратили на себя внимание Т. Юнга в связи с работами последнего по проблемам кровообращения.

Кулон жил в деревне до декабря 1795 г. Его редкие визиты в Париж были связаны с особыми обстоятельствами. В мае 1794 г. он, рискуя жизнью, принял участие в похоронах Лавуазье. В апреле 1795 г. он вынужден был приехать в столицу в связи с назначением его членом новой комиссии по мерам и весам. Окончательное возвращение в Париж произошло после избрания Кулона постоянным членом отделения экспериментальной физики Института Франции — новой национальной академии¹.

Тот факт, что Кулон был избран в состав новой академии, свидетельствует о его высоком научном авторитете. Знаменательным представляется и то обстоятельство, что он был избран не по классу механики, как раньше, а по отделению экспериментальной физики. Это говорит о постепенном возрастании роли физики в естествознании в целом.

Однако возвращение Кулону прежнего положения не привело к возобновлению работ, прерванных революцией. С годами ученый публикует все меньше мемуаров, значение которых не идет ни в какое сравнение с публикациями 1780-х гг. Наиболее значительным исследованием Кулона после революции были опыты по изучению вязкого трения, о которых шла речь в главе VII.

В институте Кулон продолжал выполнять почти те же обязанности, что и в Парижской академии наук. Он по-прежнему участвует в различных комиссиях, выступает с докладами по работам других ученых. Продолжается его деятельность в комиссии по мерам и весам. В 1798 г. он вместе с другими академиками обсуждает проблему создания новой системы мер на международном уровне. Кулон входит в состав двух подкомиссий, занимавшихся разработкой линейных мер и единиц измерения массы. В них он выступал прежде всего

¹ Институт Франции заменил три дореволюционные академии (Французскую академию, Академию надписей и Академию наук). Он делился на три класса. Первый класс составляли естественные науки, второй — моральные и политические, третий — литература и искусство.

как консультант по вопросам, связанным с научным приборостроением и методами точных измерений.

После 1800 г. постепенно сходит на нет и научно-консультационная деятельность Кулона. Последние годы жизни он посвящает организации новой системы образования во Франции. До революции система просвещения в стране была очень запутанна и несовершенна. Главным ее недостатком было схоластическое, оторванное от жизни обучение, оно не готовило молодых людей к практической деятельности. Таких специальных учебных заведений, как Мезьерская военная инженерная школа, было очень мало, да и в них одновременно могли обучаться лишь несколько десятков юношей. Кроме того, система образования во Франции имела тогда сугубо сословный (классовый) характер.

Во время революции было предложено несколько проектов реформы французской системы просвещения. Хотя ни один из них не был полностью реализован, положительные сдвиги в распространении знаний в период революции произошли. Был открыт ряд специальных школ нового типа, из которых особо стоит отметить ставшую знаменитой Политехническую школу в Париже, из стен которой вышло немало выдающихся математиков, физиков, инженеров, в частности А. Ампер, Ф. Араго, Ж.-Б. Био, Ж. Гей-Люссак, О. Коши, Э. Малюс, С. Пуассон.

Однако в силу ряда причин (главным образом вследствие острой борьбы между сторонниками различных подходов к организации просвещения) в революционную эпоху во Франции не сложилась стройная система образования. После прихода к власти Бонапарта вопрос о создании единой для всей страны системы средних школ и высших учебных заведений был вновь поставлен на повестку дня.

В 1802 г. Бонапарт назначил известного химика Ж. Шатталь министром внутренних дел и поручил ему составить план реорганизации народного образования Франции. Шатталь представил план, в котором были заложены некоторые прогрессивные идеи: отделение школы от церкви, увеличение расходов на просвещение, расширение системы стипендий и т. д. Однако Бонапарт резко отверг предложения Шатталь и дал задание другому, не менее известному химику Ф. Фуркруа подготовить новый проект.

В целом план, представленный Фуркруа, получил одобрение первого консула. Согласно этому плану учебные заведения во Франции разделялись по четырем уровням. Первые два должны были представляться начальными и средними школами, контролируруемыми местными органами власти. Третий уровень образовывала сеть лицеев, а четвертый — специальные школы. Учебные заведения двух последних уровней находились под управлением государства.

В мае 1802 г. предложения Фуркруа стали законом, а в июне Бонапарт назначил специальную комиссию из шести человек для проведения этого закона в жизнь. Во главе комиссии стоял Фуркруа, получивший звание генерального директора народного образования. Одним из членов комиссии стал Кулон. Вместе с ним в нее вошли и другие известные ученые: астроном Ж. Деламбр и зоолог Ж. Кювье.

Основной задачей комиссии была организация лицеев — привилегированных учебных заведений, которые Бонапарт рассматривал как основу всей системы. Кроме того, в обязанности членов комиссии входило посещение и проведение экзаменов в некоторых начальных школах, знакомство с учебной деятельностью средних школ, в особенности тех, которые могли быть преобразованы в лицеи. Члены комиссии должны были следить не только за уровнем знаний учащихся, но и за квалификацией педагогов, чистотой кухонь, классов и т. д. Они отвечали также за выбор городов, в которых предполагалось открыть специальные школы. Одним словом, круг служебных обязанностей членов комиссии был довольно широким.

Кулон принимал деятельное участие в работе комиссии Фуркруа. Он ездил по различным городам Франции с инспекторскими проверками, участвовал в обсуждении разнообразных мероприятий, связанных с народным образованием, и т. д. Все это требовало большой затраты сил, а Кулону уже исполнилось семьдесят лет. Поездки по стране окончательно подорвали здоровье ученого. Летом 1806 г. он заболел лихорадкой, с которой его организм уже не смог справиться. Кулон скончался в Париже 23 августа 1806 г.

Кулон оставил довольно значительное наследство супруге и сыновьям. В знак уважения к памяти о Кулоне оба его сына были определены на государственный счет в привилегированные учебные заведения. Вдова ученого, хотя и обращалась к императору с ходатайством об увеличении пенсии, мотивируя это большими заслугами мужа перед государством, вряд ли в полной мере сознавала, какое значение имело его творчество для науки. Она не позаботилась о сохранении архива Кулона: его рукописей, дневников, лабораторных журналов. Более того, научные приборы, которыми пользовался Кулон при проведении опытов в своей небольшой домашней лаборатории, через полгода после его смерти были проданы на аукционе. Таким образом, научные работы, опубликованные при жизни Кулона, стали не только важнейшими, но и практически единственными памятниками его творчества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Закончился рассказ о жизни и творчестве большого труженика, талантливого инженера и выдающегося ученого Шарля Огюстена Кулона. Его судьба и научные достижения представляют большой интерес для всех, кто интересуется историей естествознания. Однако со смертью ученого его жизнь в науке не прерывается. Идеи и методы, которые он предложил, продолжают развиваться, и, значит, его творчество продолжает оказывать влияние на прогресс научного знания. Какова же судьба работ и открытий Кулона? Каково их воздействие на развитие физики и ее экспериментальных методов?

Результатами Кулона в области исследования сопротивления материалов ученые пользовались в течение многих десятилетий. В XIX в. многие идеи, сформулированные Кулоном в его мемуаре по строительной механике, получили развитие в трудах ученых. Основополагающими стали и исследования Кулона по внешнему и внутреннему трению. В XIX в. традициям в изучении трения, заложенным Кулоном, также следовали многие ученые. Метод затухающих крутильных колебаний диска или цилиндра и в наши дни используется в вискозиметрии (для определения вязкости) газов.

Наибольший интерес представляет, конечно, судьба самого значительного открытия Кулона — основного закона электростатики. Точность, с которой Кулон подтвердил закон «обратных квадратов», была невысока; во всяком случае, она значительно уступала точности, которая была достигнута в опытах Кавендиша. Тем не менее эксперименты с крутильными весами представляли, как уже отмечалось, самостоятельный интерес. В начале XIX в. несколько исследователей пытались повторить опыты Кулона, надеясь повысить точность результатов. Однако успехов на пути, указанном Кулоном, достигнуто не было. Существенного повышения точности в подтверждении закона удалось добиться лишь Максвеллу и его сотрудникам, работавшим в Кавендишской лаборатории, которые в несколько усовершенствованной форме повторили опыт Кавендиша. Причины отказа от метода, основанного на использовании крутильных весов, указаны Максвеллом в его знаменитом «Трактате по электричеству и магнетизму»:

«Можно считать, что эксперименты Кулона с крутильными весами с некоторым приближением к точности установили закон силы. Эксперименты этого рода, однако, считаются трудными и до некоторой степени неопределенными из-за нескольких возмущающих воздействий, за которыми необхо-

димо тщательно следить, чтобы вносить соответствующие поправки.

Во-первых, два наэлектризованных тела должны иметь размеры, ощутимые в сравнении с расстоянием между ними, чтобы они могли нести заряды, достаточные для возникновения заметных сил. Тогда действие каждого тела влияет на распределение электричества на другом, так что нельзя будет даже считать, что заряды распределены по поверхности или сосредоточены в центре тяжести; этот эффект должен быть учтен путем сложных рассматриваний...

Другая трудность происходит от действия электричества, индуцированного на стенках кожуха, в котором находится прибор. Если сделать внутренность прибора в точности цилиндрической, а ее внутреннюю поверхность — из металла, то этот эффект можно считать определенным и измеримым.

Независимая трудность проистекает от несовершенства изоляции тел, вследствие которой заряд непрерывно уменьшается...»

В опытах, проведенных в Кавендишской лаборатории, было установлено, что если показатель степени расстояния в законе Кулона равен $2 \pm q$, то $q < 1/21600$. В XX в. все эксперименты по проверке закона Кулона ставились по схеме Кавендиша. Самые точные из них были проведены в 1971 г. группой американских ученых. В этих опытах были использованы последние достижения техники физического эксперимента и верхнюю границу величины q удалось понизить до фантастически малой величины: $q \lesssim 6 \cdot 10^{-16}$!

Стремление достичь предельной точности в проверке закона Кулона обусловлено весьма важной причиной. Современная теория — квантовая электродинамика — утверждает, что если закон взаимодействия неподвижных точечных зарядов отличается от строгого закона «обратных квадратов», то масса покоя фотона — переносчика электромагнитных взаимодействий — отлична от нуля. Поэтому проверка закона Кулона позволяет оценить верхний предел массы покоя фотона. Из опытов американских ученых следует, что $m_\phi \lesssim 1,6 \cdot 10^{-50}$ кг¹.

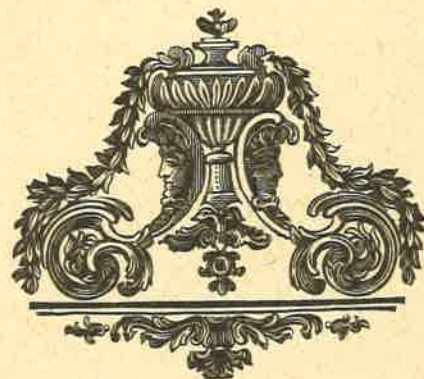
Однако отказ от метода, использующего крутильные весы для проверки закона Кулона, не означает еще дискредитацию крутильных весов как измерительного прибора. В 1798 г. Г. Кавендиш использовал крутильные весы для определения средней плотности Земли (или с точки зрения современной физики для определения гравитационной постоянной). Вопрос о приоритете в изобретении крутильных весов до сих пор дискутируется историками науки, но бесспорно, что из всех претендентов на это изобретение Кулон наиболее полно ис-

¹ Оценки, основанные на астрофизических данных, дают еще меньшую верхнюю границу массы покоя фотона: $m_\phi \lesssim 3 \cdot 10^{-63}$ кг.

следовал кручение тонких нитей и тем самым обосновал принцип, лежащий в основе этого измерительного прибора. Вероятно, правильнее всего было бы называть крутильные весы «весами Кулона — Кавендиша». Примечательно, что этот прибор, которому исполнилось уже двести лет, продолжает верой и правдой служить физикам. Наиболее точное значение гравитационной постоянной: $G = (6,6726 \pm 0,0005) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \times \text{с}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1}$ — было получено с его помощью в 1982 г. Такое «долголетие» метода — уникальное явление в современной физике.

Большой вклад Кулона в физику нашел отражение и в научной терминологии. Выражения «кулоновское взаимодействие», «кулоновский потенциал», «кулоновское поле» стали сейчас привычными. В 1881 г. на Международном конгрессе электриков, проходившем в Париже, авторитетная комиссия, в которую входили такие известные физики, как В. Томсон (лорд Кельвин), Г. Гельмгольц, Г. Кирхгоф, А. Г. Столетов и другие, единодушно назвала именем Кулона единицу количества электричества. С тех пор 1 кулон (1 Кл) как мера величины электрического заряда живет в физике.

Имеется и менее традиционное свидетельство памяти ученых и инженеров о Кулоне. На обложке одного из наиболее авторитетных международных журналов по строительной механике как символ помещена виньетка, которой завершилась первая научная работа Кулона «О применении правил максимумов и минимумов к некоторым вопросам статики, имеющим отношение к архитектуре». Представляется, что и мы можем закончить наш рассказ о выдающемся французском ученом этим изящным изображением, несущим отпечаток эпохи, в которую он жил.



ОСНОВНЫЕ ДАТЫ ЖИЗНИ Ш. КУЛОНА

- Шарль Огюстен Кулон родился 14 июня 1736 г. в г. Ангулеме.
Конец 40-х — начало 50-х гг.— учеба в Коллеже Мазарини в Париже; поездка в Монпелье.
- 1757 г.— избрание адъюнктом Королевского научного общества Монпелье по классу математики.
- 1758 г.— отъезд в Париж для подготовки к поступлению в Мезьерскую военно-инженерную школу.
- 1760—1761 гг.— учеба в Военно-инженерной школе в Мезьере.
- 1761 г.— присвоение звания лейтенанта.
- 1762—1764 гг.— служба в Бресте.
- 1764—1772 гг.— служба на Мартинике; руководство строительством форта на Монт-Гарнье.
- 1770 г.— присвоение звания капитана.
- 1772—1774 гг.— служба в Бушене.
- 1773 г.— Кулон представляет в Парижскую академию наук свою первую научную работу, посвященную строительной механике.
- 1774—1777 гг.— служба в Шербуре.
- 1776 г.— Кулон представляет военному министру записку с предложениями по реорганизации Военно-инженерного корпуса.
- 1777 г.— Кулон становится победителем конкурса Парижской академии наук, посвященного разработке прибора для исследования магнитного поля Земли.
- 1777—1778 гг.— служба в Безансоне; подготовка мемуара о проведении подводных работ.
- 1779—1780 гг.— служба в Рошфоре; опыты по исследованию внешнего трения.
- 1780—1781 гг.— служба в Лилле.
- 1781 г.— Кулон становится победителем конкурса Парижской академии наук, посвященного внешнему трению; перевод в Париж; награждение Крестом Св. Людовика; избрание в Парижскую академию наук по классу механики.
- 1783—1784 гг.— работа в Комиссии по каналам в Бретани.
- 1784 г.— представление мемуара о кручении тонких металлических нитей.
- 1785—1789 гг.— работа над серией мемуаров по электричеству и магнетизму.
- 1785—1790 (?) гг.— служба в качестве интенданта вод и фонтанов короля.
- 1786 г.— присвоение звания майора.
- 1787 г.— поездка в Англию для изучения опыта организации здравоохранения.
- 1791 г.— Кулон выходит в отставку.
- 1791—1793 гг.— работа в составе временной комиссии по мерам и весам.
- Август 1793 г.— Парижская академия наук распущена.
- 1793—1795 гг.— Кулон с семьей живет и работает в своем поместье близ Блуа.
- 1795 г.— избрание членом Института Франции по классу экспериментальной физики.
- 1802 г.— назначение членом комиссии по реформе народного образования.
- 23 августа 1806 г. Кулон умер в Париже.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава I. Детство и юность	9
Глава II. Служба на Мартинике	16
Глава III. Первая научная работа	22
Глава IV. Служба на родине	30
Глава V. Исследование внешнего трения	43
Глава VI. В Париж	56
Глава VII. Исследование кручения и изобретение кру- тильных весов	68
Глава VIII. Поиски «закона электрической силы» до Кулона	76
Глава IX. Работы Кулона по электричеству и магне- тизму	84
Глава X. Революция. Последние годы	100
Заключение	107
Основные даты жизни Ш. Кулона	110

Учебное издание

Филонович Сергей Ростиславович

ШАРЛЬ КУЛОН

Зав. редакцией В. А. Обмения
Редактор Л. С. Мордовцева
Младший редактор О. В. Агапова
Художественный редактор Н. А. Парцевская
Художник В. А. Сайчук
Технический редактор Т. В. Сидорова
Корректор Т. С. Крылова

ИБ № 11063

Сдано в набор 26.10.87. Подписано к печати 04.08.88. А 05738. Формат 60×90^{1/16}. Бумага офсетная № 2. Гарнитура школьная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,0. Усл. кр.-отт. 7,5. Уч.-изд. л. 7,07. Тираж 92000 экз. Заказ 1668. Цена 30 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета РСФСР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 120846, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.
Смоленский полиграфкомбинат Росглаволиграфпрома Государственного комитета РСФСР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 214020, г. Смоленск, ул. Смольянинова, 1.