

Рис.4. Схема возникновения индуктивного сопротивления

ря) и к повороту вектора аэродинамической силы \vec{F} на некоторый угол α (рис.4). Теперь уже сила не перпендику-

Итак, заменим вихревую систему самолета П-образным вихрем (такая упрощенная схематизация использовалась на заре авиации, используется и сейчас в учебных курсах на начальном этапе изучения аэродинамики самолета). Наличие свободных вихрей приводит к скосу потока в области крыла (в нашей схематизации – присоединенного вих-

лярна набегающему потоку, а имеет составляющую \vec{X}_i против направления полета, которая называется индуктивным сопротивлением. Чем интенсивнее свободные вихри и чем меньше размах крыла, тем больше скос и выше индуктивное сопротивление.

Посмотрим теперь, что происходит, когда самолеты находятся в возмущенном потоке. Если самолеты расположены «пеленгом», то скос потока в области конца крыла последующего самолета будет меньше, а значит, индуктивное сопротивление на этой части крыла будет ниже.

Предлагаем читателю самостоятельно рассмотреть случай полета «клином» – здесь выигрыш будет достигаться для двух последующих самолетов.

Разглядывая шариковую ручку

А.СТАСЕНКО

ОДНАЖДЫ, ВНИМАТЕЛЬНО СЛУШАЯ ЛЕКЦИЮ ПО ОПТИКЕ и разглядывая свою шариковую ручку с шестигранным прозрачным корпусом, Студент заметил, что стержень с пастой меняет свой видимый диаметр в зависимости от угла поворота. «Э, брат, – подумал Студент, – тут все дело в преломлении лучей». Но, как сказал Лектор, еще во втором веке Клавдий Птолемей описал явление преломления света в трактате «Оптика», а его последователи даже предложили связь между углами падения α и преломления β в виде $\frac{\alpha}{\beta} = n$, где n – постоянная величина, называемая коэффициентом преломления. Это верно, конечно, только для малых углов, а для любых углов неверно. Потому что правильный закон преломления $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$ лишь в семнадцатом веке изложил в своих лекциях (в Лейдене) Виллеброрд Снеллиус.

Но что же ручка? «Нельзя ли, – подумал Студент, – узнать коэффициент преломления пластмассы, из которой сделан ее корпус?» И приступил к делу.

Разобрав ручку, он прежде всего измерил геометрические размеры – радиус стержня r , внутренний радиус корпуса R , расстояние между внешними параллельными гранями b (рис.1), – благо под руками была тетрадь в клетку, правда не самый точный инструмент.

Были отмечены два интересных результата наблюдения: вдоль линии $A1O$ (перпендикулярно грани) стержень казался тоньше реального размера ($r' < r$), а вдоль линии BCO (луч проходит через диаметрально противоположные ребра) – казался самым толстым.

Начнем с первого случая. Так как наблюдение ведется с расстояния порядка 300 мм, то самый большой (внешний) поперечный размер ручки $b \sim 8$ мм мал по сравнению с этим расстоянием, не говоря уж о диаметрах внутренних цилин-

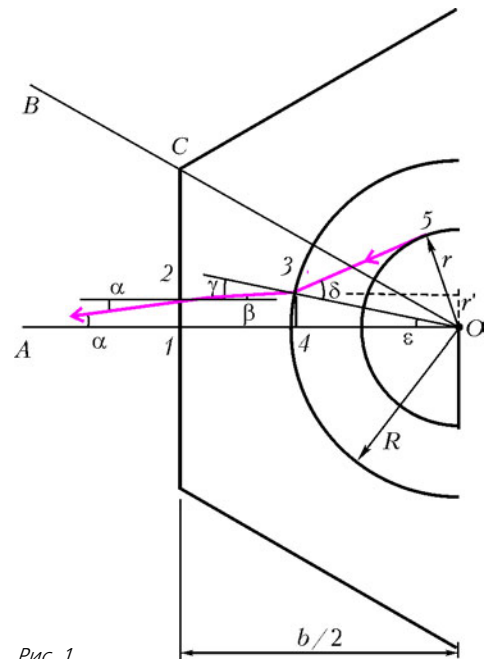


Рис.1

дров. Рассмотрим луч 532A, который несет в глаз информацию о размере стержня. Углы α и β малы, так что здесь птолемеевцы могли бы порадоваться: $\frac{\alpha}{\beta} \approx n$. По этой же причине отрезок луча 23 почти параллелен отрезку 14 (ведь β еще меньше, чем малый угол α), так что длины отрезков 12 и 34 почти равны друг другу и кажущемуся радиусу r' , а $\angle \gamma \approx \angle \epsilon$. Отсюда следует

$$\frac{r'}{AO} = \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha, \quad \frac{\sin \delta}{\sin \gamma} = n \approx \frac{\sin \delta}{\sin \epsilon} \approx \frac{\sin \delta}{r'/R} \approx \frac{\sin \delta}{AO \cdot \alpha / R}.$$

Но треугольник $O53$ – прямоугольный, поскольку отрезок 35 – касательная к окружности стержня, поэтому $\sin \delta = \frac{r}{R}$. В результате получаем

$$n \approx \frac{r}{AO \cdot \alpha} = \frac{r}{AO \cdot r'/AO} = \frac{r}{r'}.$$

Измерив $2r \approx 2,5$ мм и $2r' \approx 1,5$ мм, находим $n \approx 5/3$.

«Э, – ведь это коэффициент преломления такого прекрасного стекла, как тяжелый флинт,» – подумал Студент и решил для уверенности рассмотреть второй случай – направ-

(Продолжение см. на с. 34)

...Мы полагаем, что всякая частичка песка, влаги или дыма, будучи сначала притянута, а затем оттолкнута, уносит с собой дольку электрического огня, которая, однако, сохраняется в этих частицах, пока они не передадут ее куда-нибудь еще.

Бенджамин Франклин

Нельзя создать один вид электричества без того, чтобы создать другой.

Франц Эпинус

Сегодня я предьявляю Академии электрические весы... Они измеряют с наивысшей точностью электрическое состояние и электрическую силу тела, как бы мала ни была степень его электризации.

Шарль Кулон

...Из этих двух законов следуют все предсказания электростатики. Но одно дело высказать эти вещи математически, и совсем другое — применять их с легкостью и с нужной долей остроумия.

Ричард Фейнман

А так ли хорошо знакома вам электростатика?

Этот раздел физики иногда определяют как «некоторый частный и наиболее простой случай взаимодействия зарядов». Слышали бы это ученые XVII—XIX веков, шедшие тернистым путем осмысления поразительных электростатических опытов! Нам ближе позиция Р.Фейнмана, призывавшего изучать электростатику потому, что она помогает ориентироваться и во многих иных вопросах физики.

Действительно, уравнения электростатики позволяют разобраться с задачами прохождения тепла, с вычислением натяжения мембран, с диффузией нейтронов в ядерном реакторе, с обтеканием жидкостью шара, с расчетом равномерного освещения... Еще в школе вы знакомитесь с объяснением опытов Резерфорда и моделью атома Бора, основанными на действии кулоновских сил. Позже узнаете, как работает атомно-силовой микроскоп, регистрирующий ничтожно малые электростатические силы. Возможно, когда-нибудь коснетесь проблемы самодействия, связанной с теорией удивительнейших крошечных объектов — космических струн. Вот куда может завести нас «простая» электростатика!

Не будем забывать и о множестве сугубо практических вопросов, к которым она имеет прямое отношение, — например, электростатическая защита в быту и на производстве или происходящие в атмосфере электрические явления.

Наверное, уже сказано достаточно хвалебных слов в адрес электростатики. Хотелось бы, чтобы желание их произнести появилось и у вас после изучения предлагаемого сегодня материала.

Вопросы и задачи

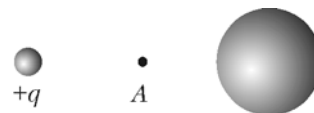
1. Можно ли наэлектризовать трением латунную палочку?
2. Прозрачные пленки для пищевых продуктов часто прилипают к стеклянным банкам или бутылкам. Однако если сосуды мокрые, этого не происходит. Почему?
3. Как с помощью свечи определить знаки зарядов пластин раздвижного конденсатора, соединенных с полюсами действующей электрофорной машины?
4. Изменится ли сила, действующая на разноименные заряды, если между ними поместить незаряженный металлический шарик?

5. Как объяснить, почему заряды каждого знака, индуцированные на нейтральном проводнике поднесенным к нему зарядом $+q$, всегда меньше q ?

6. Зарядится ли нейтральный проводник при внесении его во внешнее электрическое поле?

7. Два одинаковых по величине заряда находятся на некотором расстоянии друг от друга. В каком случае напряженность электрического поля в точке, лежащей посередине между ними, больше: если эти заряды одноименные или разноименные?

8. Электрическое поле создается положительным зарядом $+q$. Как изменится напряженность и потенциал электрического поля в точке A , если справа от нее поместить незаряженный проводящий шар, как изображено на рисунке?



9. Плоский конденсатор зарядили до разности потенциалов, немного не достигающей пробойного значения, и отсоединили от источника напряжения. Произойдет ли пробой, если пластины начать сближать?

10. Внутри металлической незаряженной сферы находится точечный заряд $+q$, смещенный от центра сферы. Как будет выглядеть картина силовых линий электрического поля внутри и вне сферы?

11. Человек, стоя на изолирующей подставке, прикасается к заряженному изолированному проводнику. Полностью ли разрядится при этом проводник?

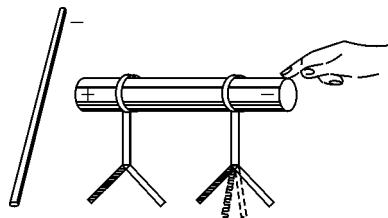
12. Внутри заземленной металлической сферы находится точечный заряд. Чему равна напряженность электрического поля вне сферы?

13. Почему стержень электроскопа заканчивается шариком, а не острием?

14. Два шара, большой и маленький, равномерно заряжены с одинаковой поверхностной плотностью. Будут ли одинаковы потенциалы этих шаров?

15. При поднесении к нейтральному металлическому телу отрицательно заряженной палочки произойдет перераспределение зарядов и листочки электроскопов разойдутся так, как показано на рисунке.

Опадут ли листочки правого электроскопа (изображено пунктиром), если коснуться правого торца тела рукой (т.е. заземлить тело)?



16. Пластины плоского конденсатора один раз раздвигают, оставляя их все время подключенными к источнику напряжения, другой раз — отключенными после первоначальной зарядки. В каком из этих двух случаев нужно совершить большую работу по раздвиганию пластин? Как изменяется при этом энергия конденсатора?

17. Между пластинами плоского заряженного конденсатора помещают диэлектрическую пластинку, как изображено на рисунке. Изменится ли напряженность электрического поля в точке A после внесения пластинки?

18. Что произойдет с энергией плоского конденсатора, если: а) при неизменной разности потенциалов между его пластинами увеличить все его геометрические размеры в k раз; б) при тех же размерах увеличить заряд в n раз?

Микроопыт

У вас имеются три проводящих шара — один заряжен положительно, два других нейтральны. Как с помощью первого шара, не изменяя его заряда, наэлектризовать два других шара — один отрицательно, другой положительно?

Любопытно, что...

...английский ученый Симмер замечал характерное потрескивание и проскакивание маленьких искр всякий раз, когда снимал шелковые чулки. Наблюдения за столь необычными «приборами» навели Симмера на мысль о существовании двух видов электричества. Ученый также заряжал от чулок лейденскую банку, воспламенял их разрядами спирт и вообще развлекал своими опытами не только коллег, но даже принца Уэльского.

...электростатическую индукцию — наведение заряда без прямого соприкосновения тел, — впервые замеченную английским физиком Греем, позже смог правильно объяснить работавший в России немецкий ученый Эпинус, что позволило построить первый прототип плоского конденсатора.

...Ломоносов, отрицающая электрическую теорию Франклина (как и многие европейские ученые), считал недопустимо опасной затеей установку громоотводов. А в 1784 году один француз чуть не был осужден за «притягивание» своим громоотводом молнии на головы сограждан. Спас же обвиняемого блестяще защищавший его на суде никому еще не известный тогда адвокат Робеспьер.

...то, что электрическое поле внутри равномерно заряженной сферы равно нулю, Франклин открыл за 18 лет, а Кавендиш — за 12 лет до появления закона Кулона, т.е. «закона обратных квадратов», из которого это явление вытекало как следствие.

...за 35 лет до опытов Кулона, в 1785 году, знаменитый философ Иммануил Кант высказал идею, связывающую «закон обратных квадратов» с трехмерностью нашего пространства. Но лишь в начале XX века физики вернулись к этой идее и подтвердили ее.

...распространенному представлению электростатического поля с помощью силовых линий, введенному Фарадеем, предшествовало пятью годами ранее представление этого поля с помощью эквипотенциальных поверхностей, сделанное Гауссом.

...для опытного доказательства закона сохранения заряда Фарадей экспериментировал с огромным металлическим шаром. В его сердцевины ученый помещал большие электростатические машины и разнообразное диковинное оборудование — в том числе кошачий мех, которым натирал стеклянные палочки, — отчего внутренность шара походила на лабораторию из современных фильма ужасов.

...исследования электрического поля Земли показывают, что она обладает отрицательным зарядом примерно в полмиллиона кулонов. Однако по мере подъема это поле быстро идет на убыль и уже на высоте 10 километров становится ничтожно слабым, поскольку на еще больших высотах Землю окружает слой положительно заряженных (ионизированных) молекул.

...при дроблении воды на капли происходит разделение электрических зарядов, причем крупные капли заряжаются положительно, а мелкие — отрицательно. Из-за более быстрого оседания крупных капель в воздухе создается заметное электрическое поле, обнаружить которое можно, например, в душевой кабине или около водопадов. А во время мойки танкеров мощными брандспойтами этот эффект не раз приводил к внушительным взрывам.

...рисунок к задаче 15 был приведен в книге «Эволюция физики» выдающихся ученых Эйнштейна и Инфельда. Как видите, даже авторитетным физикам оказалось не так-то легко анализировать простые электростатические опыты.

Что читать в «Кванте» об электростатике

(публикации последних лет)

1. «Проводящий шар в однородном поле» — 2001, №1, с.39;
2. «Электрическая машина в атмосфере» — 2001, №2, с.23;
3. «Франклин — изобретатель громоотвода» — 2001, №6, с.17;
4. «Если вращается елочный шарик» — 2002, №3, с.44;
5. «Электростатическое поле в веществе» — 2002, №5, с.40;
6. «Электричество» — 2003, Приложение №2, с.5–52;
7. «Потенциал электростатического поля» — 2003, №3, с.46;
8. «Нестандартные конденсаторы» — 2004, №3, с.45;
9. «Ковчег завета и электрическая машина» — 2004, №5, с.34;
10. «Физический калейдоскоп» — 2004, Приложение №6, с.58–69;
11. «Поляризованный шар — это просто» — 2005, №3, с.37.

Материал подготовил А.Леонович

