

Чивилев Виктор Иванович

Доцент кафедры общей физики МФТИ,
кандидат физико-математических наук
Заслуженный работник высшей школы
Российской Федерации
Лауреат премии Правительства РФ
в области образования за 2020 г.



Электризация, электростатическая индукция, поляризация

В статье разъяснены на качественном уровне понятия электризации, электрического поля, элементарного электрического заряда, проводника, свободного заряда, явления электростатической индукции, диэлектрика, явления поляризации, связанных зарядов. Приведены примеры решения задач. Предназначается для учителей и учеников 8 – 11 классов. Материал можно использовать при подготовке к ЕГЭ в 11 классе.

Электризация. Закон сохранения электрического заряда

Многочисленные опытные факты подтверждают, что тела могут быть заряженными. Заряженные тела отталкиваются либо притягиваются, даже не соприкасаясь друг с другом и находясь в вакууме. Если на теле появились заряды, то говорят, что произошла *электризация* тела. Электризацию можно осуществить трением, потерев одно тело о другое тело из другого вещества или коснувшись заряженным телом о незаряженное. В школьных учебниках приведены примеры электризации. Заряды бывают положительные и отрицательные. Разноименно заряженные тела притягиваются. Одно-

именно заряженные тела обычно отталкиваются. При всех взаимодействиях в макромире и микромире выполняется *закон сохранения электрического заряда: алгебраическая сумма зарядов системы сохраняется, если через границы системы не проходят электрические заряды*. Следует ещё раз отметить, что закон сохранения заряда справедлив не только при взаимодействии макроскопических тел (тел, состоящих из очень большого числа атомов), но и при взаимодействии элементарных частиц, когда в результате ядерных реакций одни частицы исчезают, а другие появляются.

Электрическое поле

Взаимодействие между заряженными телами осуществляется через *электрическое поле*. Дать определение электрического поля через понятия механики невозможно, так как электрические явления – это другие явления, подчиняющиеся совсем другим законам. Электрическое поле обладает рядом свойств. Основным свойством электрического поля является способность поля действовать на заряженные тела. За направ-

ление электрического поля в выбранной точке пространства берется направление действия силы на положительный заряд (небольшое положительно заряженное тело), помещенный в выбранную точку. Электрическое поле – особый вид материи. Электрическое поле возникает вокруг заряженных тел. Говорят, что электрическое поле, созданное одним заряженным телом, действует на другое заряженное тело.

Строение вещества. Элементарный электрический заряд

Атомы любого вещества состоят из ядра и электронной оболочки. Размеры ядра значительно меньше размеров самого атома. В электронной оболочке содержится несколько электронов. Все электроны имеют одинаковый отрицательный заряд. Модуль этого заряда называется *элементарный электрический заряд*. Это наименьший из встречающихся в природе электрических зарядов. Заряд электрона неотделим от самого электрона – это свойство электрона.

Ядро атома состоит из протонов и нейтронов. Заряд каждого протона положительный и равен элементарному электрическому заряду. Нейтрон – нейтральная частица, то есть заряда не имеет. Масса протона приблизительно в 1840 раз больше массы электрона. Масса нейтрона незначительно больше массы протона. Неионизированный атом нейтрален, поэтому число протонов в ядре атома равно числу электронов в его электронной оболочке.

Число нейтронов в ядре любого атома обычно немного больше числа протонов. Поэтому масса всех элек-

тронов почти у всех атомов химических элементов в 4000 с лишним раз меньше массы ядра, то есть почти вся масса атома сосредоточена в ядре. Этот факт пригодится для объяснения практической неизменности массы тела при получении телом заряда.

Номер химического элемента в таблице Менделеева совпадает с числом протонов в ядре (и с числом электронов в атоме). Число же нейтронов в ядре одного и того же химического элемента может быть разным. Атомы с одинаковым числом протонов в ядре и различным числом нейтронов в ядре называются *изотопами*. Изотопы есть почти у всех химических элементов. Молярные массы изотопов одного и того же химического элемента немного отличаются, химические свойства близки.

Приведем примеры строения атомов. Атом водорода (точнее, наиболее распространенный изотоп водорода) имеет ядро, состоящее из одного протона, нейтронов нет, электронная оболочка состоит из одного электрона. Наиболее распространенный изотоп атома гелия имеет

ядро из двух протонов и двух нейтронов, электронная оболочка содержит два электрона. Третий химический элемент в таблице Менделеева – литий – встречается в виде трех изотопов. Ядро атома каждого изотопа содержит три протона, в электронной оболочке атома три электрона. В ядрах изотопов лития

содержится 3, или 4, или 5 нейтронов. Природное железо представляет смесь четырех изотопов. Ядро атома каждого изотопа железа содержит 26 протонов, в электронной оболочке атома 26 электронов, в ядрах изотопов или 28, или 30 (распространенность этого изотопа 92%), или 31, или 32 нейтрона.

Проводники, механизм проводимости, свободные заряды. Диэлектрики

Проводники – это вещества, в которых заряженные частицы (обычно это электроны или ионы) могут перемещаться под действием внешнего электрического поля, т.е. может возникать электрический ток. Заряды этих частиц называются *свободными зарядами*. К проводникам относятся металлы, графит, электролиты (растворы солей, оснований, кислот и некоторые расплавленные вещества). В металлах и графите часть электронов из электронных оболочек атомов может достаточно свободно перемещаться между атомами, при этом сами атомы не перемещаются. Эти

электроны называются свободными. В этом случае роль свободных зарядов играет заряд свободных электронов. В электролитах могут перемещаться ионы, поэтому роль свободных зарядов играют заряды ионов.

Диэлектрики – это вещества, в которых концентрация заряженных частиц, которые могут достаточно свободно перемещаться по телу вещества, значительно меньше, чем в проводниках, – примерно в 10^{20} раз. Поэтому диэлектрики практически не проводят ток, т.е. являются изоляторами. Есть еще полупроводники, но это отдельный разговор.

Объяснение электризации

При трении одного незаряженного тела о другое незаряженное тело часть электронов может переходить от одного к другому. В результате тела получают равные по модулю и противоположные по знаку заряды. Если тела разъединить, то заряды на телах останутся. Имеем электризацию тел. Механизм перехода электронов при трении ясен не до конца. Есть даже мнение, что в некоторых случаях переходят ионы. Но факт электризации трением остается.

Наэлектризовать незаряженное тело можно, если привести его в со-

прикосновение с заряженным телом. Часть заряда с заряженного тела перейдет на незаряженное. Если оба тела – проводники, то эффект электризации незаряженного тела будет достигнут. Если при этом проводники являются металлами, в которых роль свободных зарядов играют электроны (точнее, заряды электронов), то от одного металла к другому перейдут фактически электроны. Но если хотя бы одно из тел – диэлектрик, то зарядить незаряженное тело, только коснувшись заряженного, практически невозможно.

Это связано с тем, что заряды по диэлектрику перемещаться не могут. Если же провести диэлектриком по проводнику, то можно частично пе-

редать заряд незаряженному телу, так как проводник будет касаться диэлектрика не в одном месте, а в нескольких местах диэлектрика.

Проводники в электрическом поле заряженного тела. Явление электростатической индукции

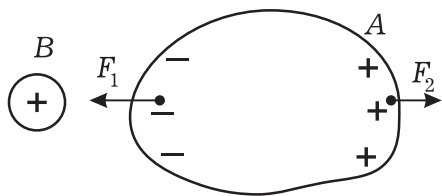


Рис. 1

Электрическое поле, созданное неподвижными зарядами, называется электростатическим полем. Электростатическое поле – частный случай электрического поля.

Пусть незаряженный проводник A (например, металлическое тело или сосуд с электролитом) помещен в электростатическое поле, созданное положительно заряженным телом B (рис. 1). Не обращая внимания на знак свободных зарядов проводника A , можно сказать, что свободные заряды проводника A начнут перемещаться: отрицательные заряды притянутся к положительному заряду тела B и скопятся на левом крае проводника A , положительные заряды проводника A оттолкнутся от положительного заряда тела B и скопятся на правом крае проводника A . Явление перераспределения зарядов в проводнике под действием внешнего электростатического поля имеет название *электростатическая индукция*. Если проводник A – металл, то реально перемещаются свободные электроны: на

левом крае проводника A появится избыток электронов, а на правом – недостаток, т.е. положительный заряд.

Разберемся с силой, действующей на проводник A . Отрицательно заряженный край проводника A расположен ближе к положительному заряду тела B , чем положительно заряженный край проводника A . Поэтому сила притяжения F_1 между положительным зарядом тела B и отрицательным зарядом края проводника A больше силы отталкивания F_2 между положительным зарядом тела B и положительным зарядом края проводника A . В результате проводник A притягивается к заряженному телу B . Если изменить знак заряда тела B , то изменятся знаки зарядов на краях проводника A – и проводник A будет опять притягиваться к B . Это можно и полезно проверить, сделав рисунок. Для более вытянутого (в направлении поля, созданного B) проводника A сила притяжения больше. Например, незаряженный проводник A_1 притягивается к заряженному телу B сильнее, чем незаряженный проводник A_2 к этому же телу B (рис. 2 и рис. 3).

Итак, любое незаряженное проводящее тело (незаряженный проводник) притягивается к заряженному любым знаком телу. Объясняется это явлением электростатической индукции.

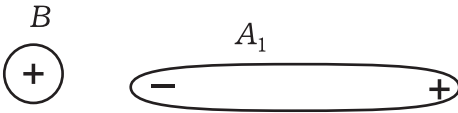


Рис. 2

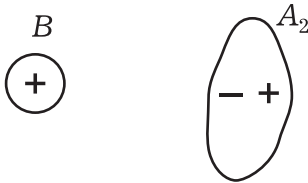


Рис. 3

Рассмотрим теперь поведение заряженного проводника A , внесенного в электростатическое поле заряженного тела B . Пусть заряженный отрицательно проводник A помещен в электростатическое поле, созданное положительно заряженным телом B . На рис. 4 и рис. 5 показаны варианты перераспределения зарядов в проводнике A из-за электростатической индукции. Проводник A будет притягиваться к B .

Пусть теперь заряженный уже положительно проводник A помещен

в электростатическое поле, созданное положительно заряженным телом B . На рис. 6 и рис. 7 показаны варианты перераспределения зарядов в проводнике A из-за электростатической индукции. Проводник A теперь может как отталкиваться от одноименно заряженного тела B (рис. 6), так и притягиваться к телу B (рис. 7). Оказалось, что одноименно заряженные тела могут не только отталкиваться, но и притягиваться! Не противоречит ли это здравому смыслу? Вариант притяжения можно осуществить, если взять положительный заряд тела A настолько малым, что тело A можно считать практически незаряженным. А любой незаряженный проводник притягивается к заряженному телу. Кажущееся противоречие удалось разрешить, рассматривая электростатическую индукцию.

Полезно заметить (без доказательства), что перераспределение зарядов в результате электростатической индукции происходит только на поверхности проводника, внутренность проводника остается нейтральной.

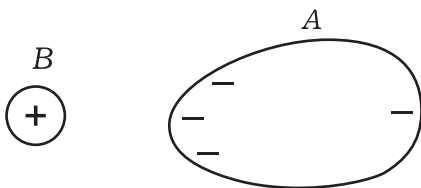


Рис. 4

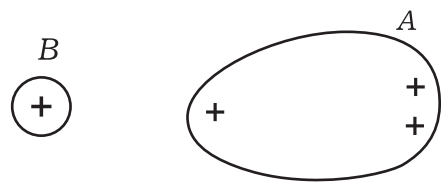


Рис. 6

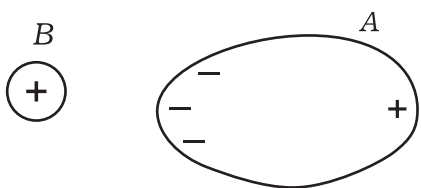


Рис. 5

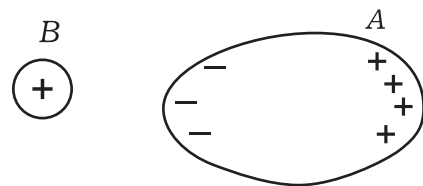
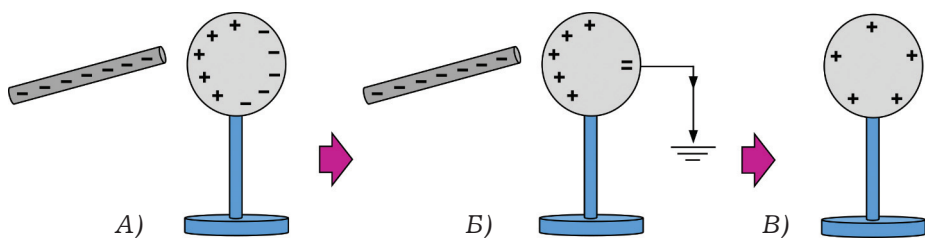


Рис. 7



А) Если к изначально незаряженному проводящему шару поднести, не касаясь шара, заряженную отрицательно палочку, то на шаре произойдет перераспределение зарядов из-за явления электростатической индукции.

Б) Заземляем шар (или соединяем проводом с любым проводящим незаряженным телом достаточно больших размеров). Тогда некоторый отрицательный заряд уйдет из шара на Землю. Можно сказать и так: с Земли на шар перейдет дополнительный положительный заряд.

В) Отсоединяем заземление и затем уносим палочку. На шаре останется положительный заряд.

Диэлектрики в электрическом поле заряженного тела.

Явление поляризации

Атомы и молекулы диэлектрика в целом нейтральны, состоят из положительно заряженных ядер и электронов, несущих отрицательный заряд. Диэлектрики можно разделить на два вида: полярные и неполярные. *Полярные диэлектрики* состоят из молекул, у которых «центры распределения» положительных и отрицательных зарядов в молекуле не совпадают, т.е. смещены друг относительно друга. Говорят, что имеем дело с полярными молекулами. *Неполярные диэлектрики* состоят из молекул, у которых «центры распределения» положительных и отрицательных зарядов в молекуле совпадают, т.е. имеем неполярные молекулы.

Рассмотрим поведение незаряженного полярного диэлектрика, помещенного во внешнее электростатическое поле. Пусть незаряженный полярный диэлектрик А помещен в электростатическое поле, созданное

положительно заряженным телом В (рис. 8). Тогда полярная молекула, не смещаясь в целом, будет стараться повернуться так, что отрицательно заряженный конец молекулы станет ближе к положительно заряженному телу В, чем положительно заряженный конец молекулы. В результате на левом крае диэлектрика «вылезут» отрицательные заряды, а на правом – положительные. Эти заряды называются *связанными зарядами* или *поляризационными зарядами*. Такое название зарядов подчеркивает, что связанные заряды не могут перемещаться по телу диэлектрика. Явление появления связанных зарядов имеет название *поляризация*. Следует заметить, что явление поляризации диэлектрика может наблюдаться не только при помещении диэлектрика во внешнее электростатическое поле, но и при нахождении диэлектрика во внешнем электрическом поле.

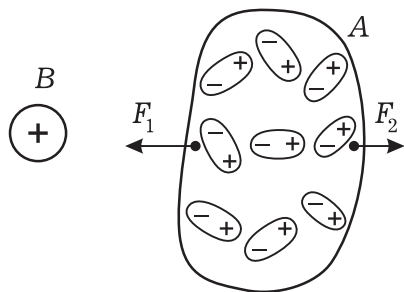


Рис. 8

Разберемся с силой, действующей на диэлектрик A (рис. 8). Как и в случае с проводником, отрицательно заряженный край диэлектрика A расположен ближе к положительному заряду тела B , чем положительно заряженный край диэлектрика A . Поэтому сила притяжения F_1 между положительным зарядом тела B и отрицательным зарядом края диэлектрика A больше силы отталкивания F_2 между положительным зарядом тела B и положительным зарядом края диэлектрика A . В результате диэлектрик A притягивается к заряженному телу B . Если изменить знак заряда тела B , то изменятся знаки зарядов на краях диэлектрика A , и диэлектрик A будет опять притягиваться к B . Это можно и полезно проверить, сделав

рисунок. Как и для проводника, для более вытянутого (в направлении поля, созданного B) диэлектрика A сила притяжения больше.

Рассмотрим теперь поведение незаряженного неполярного диэлектрика, помещенного во внешнее электростатическое поле. Под действием внешнего поля «центры распределения» положительных и отрицательных зарядов в неполярной молекуле смещаются в противоположных направлениях. Неполярная молекула во внешнем электрическом поле стала похожей на полярную. В результате наступит поляризация диэлектрика и появятся связанные заряды. Итак, неполярный диэлектрик, помещенный во внешнее электростатическое поле, ведет себя, как полярный. Если внешнее электростатическое поле создается заряженным телом (знак заряда любой), то неполярный диэлектрик, как и полярный, будет притягиваться к заряженному телу.

Можно сделать вывод: *любой незаряженный диэлектрик притягивается к заряженному любым знаком телу*. Объясняется это явлением поляризации.

Почему при электризации (получении телом заряда) изменение массы тела не учитывается?

Если стальной шарик заряжен положительно, то это означает, что у шарика изъята часть электронов. Его масса должна уменьшиться на массу изъятых электронов. При получении шариком отрицательного заряда его масса должна увеличиться. Сообщить большой заряд телу трудно, так как заряд начинает «стекать» в атмосферный воздух или проскакивает искра (разряд)

между телом и окружающими телами. Оказывается, что у реально заряженных тел забирается или сообщается им ничтожная доля от общего количества электронов в теле. Эта доля примерно не более чем $1/10^{14}$. А с учетом того, что масса всех электронов в любом атоме примерно в 4000 раз меньше массы атома, получим, что уменьшение или увеличение массы тела при

электризации составит величину примерно в 10^{17} раз меньшую массы тела. В реальной ситуации изменение массы тела еще меньше. Такие изменения массы тела при

электризации невозможно обнаружить на самых чувствительных весах! Поэтому считается, что *при сообщении телу заряда его масса не изменяется.*

Выводы

1. *Электризацией* называется сообщение телу заряда. Электризацию можно осуществить трением или коснувшись телом о заряженное тело.

2. При всех взаимодействиях в макром мире и микромире выполняется *закон сохранения электрического заряда*: алгебраическая сумма зарядов системы сохраняется, если через границы системы не проходят электрические заряды.

3. Электрическое поле обладает рядом свойств. Основным свойством электрического поля является способность поля действовать на заряженные тела.

4. Атомы любого вещества состоят из ядра и электронной оболочки. Все электроны имеют одинаковый отрицательный заряд. Модуль этого заряда называется *элементарным электрическим зарядом*. Это наименьший из встречающихся в природе электрических зарядов. Заряд электрона неотделим от самого электрона – это свойство электрона.

5. *Проводники* – это вещества, в которых заряженные частицы (обычно это электроны или ионы) могут перемещаться под действием внешнего электрического поля, т.е. может возникать электрический ток.

Заряды этих частиц называются *свободными зарядами*.

6. *Диэлектрики* – это вещества, в которых концентрация заряженных частиц, которые могут достаточно свободно перемещаться по телу вещества, значительно меньше, чем в проводниках, – примерно в 10^{20} раз. Поэтому диэлектрики практически не проводят ток, т.е. являются изоляторами.

7. Явление перераспределения зарядов в проводнике под действием внешнего электростатического поля имеет название *электростатическая индукция*.

8. Явление появления *связанных зарядов* в диэлектрике, помещенном во внешнее электрическое поле, имеет название *поляризация*.

9. Любое незаряженное проводящее тело (незаряженный проводник) притягивается к заряженному любым знаком телу. Объясняется это явлением электростатической индукции.

10. Любой незаряженный диэлектрик притягивается к заряженному любым знаком телу. Объясняется это явлением поляризации.

11. Изменение массы тела при электризации ничтожно мало. Поэтому считается, что при сообщении телу заряда его масса не изменяется.

Примеры решения задач

Задача 1. Стеклянная палочка, потертая о шелк, приобрела положительный заряд 10 нКл. Какой заряд приобрел кусок шелка?

Решение. По закону сохранения заряда шелк приобрел заряд -10 нКл.

Задача 2. Два одинаковых по размерам металлических шарика

имеют заряды $q_1 = -3$ мкКл и $q_2 = 7$ мкКл. Шары привели в соприкосновение, а затем разнесли. Найти заряд каждого шарика.

Решение. Суммарный заряд шариков $q = q_1 + q_2 = 4$ мкКл. Заряд каждого шарика станет $q/2 = 2$ мкКл.

Задача 3. Положительно заряженная туча движется с запада на восток. Какого знака заряд появится в поверхностном слое Земли под тучей и куда он перемещается?

Решение. Земля – проводник. Из-за явления электростатической индукции в поверхностном слое Земли под тучей появится отрицательный заряд. Он будет перемещаться по поверхности Земли вслед за тучей, т.е. на восток.

Задача 4. Молниеотвод (громоотвод) представляет собой металлический стержень, соединенный толстой проволокой с Землей. Над молниеотводом проходит отрицательно заряженная туча. Какого знака заряд появится у стержня молниеотвода?

Решение. Земля, проволока и стержень – одно проводящее тело. Из-за электростатической индукции в стержне появится положительный заряд.

Задача 5. Если поднести заряженный положительно металлический стержень к кусочку металлической фольги, то фольга притянется к стержню. А затем, после касания стержня, фольга отскакивает от стержня. Объяснить.

Решение. Подразумевается, что фольга изначально нейтральна. Из-за явления электростатической индукции фольга притягивается к стержню. При касании стержня фольга заряжается от стержня зарядом одного знака со стержнем и отталкивается от стержня.

Задача 6. К стержню электрометра поднесли, не касаясь его, положительно заряженное тело. Листочки электрометра разошлись, хотя заряд электрометру не передавался. Почему?

Решение. Стержень и листочки – одно проводящее тело. Из-за явления электростатической индукции на верхнем конце стержня появятся отрицательные заряды, а на листочках – положительные. Листочки будут отталкиваться друг от друга и разойдутся.

Задача 7. Отрицательно заряженный проводящий шар A поднесли достаточно близко к проводящему шару B . Оказалось, что шары не притягиваются и не отталкиваются. Что можно сказать о знаке заряда шара B ?

Решение. Если бы шар B был заряжен положительно или нейтрален, то шары бы притягивались. Значит, шар B заряжен отрицательно, но его заряд (или заряд шара A) по модулю достаточно мал. Сила отталкивания двух отрицательно заряженных шаров компенсируется силой притяжения из-за явления электростатической индукции.

Задача 8. Кусочек незаряженной металлической фольги притягивается к заряженному проводящему стержню, касается стержня, а затем отскакивает от него. Маленькие кусочки бумаги притягиваются к этому стержню и прилипают к нему, не отскакивая. Почему?

Решение. Изначально нейтральная фольга из-за явления электростатической индукции притягивается к стержню, касается его, получает заряд того же знака, что и стержень, и отталкивается от стержня. Кусочек бумаги притягивается к стержню из-за явления поляризации. Но после



касания стержня не получает практически от стержня заряд, так как не проводник. Поэтому останется прилипшим к стержню.

Задача 9. Отрицательно заряженное тело притягивает к себе шарик из пенопласта, подвешенный на непроводящей нити. Можно ли утверждать, что шарик заряжен обязательно положительно?

Решение. Нет, так как нейтральный или очень слабо отрицательно заряженный диэлектрик тоже притягивается к отрицательно заряженному телу.

Задача 10. Два одинаковых пластиковых полых шарика висят на нитях. Один из шариков заряжен. Как определить, какой шарик заряжен, не изменяя суммарного заряда каждого шарика?

Решение. Поднести поочередно к шарикам, не касаясь их, незаряженное проводящее тело, например, металлическую линейку. Шарик, который притягивается к телу, и будет заряженным, так как нейтральный проводник притягивается к заряженному телу из-за явления электростатической индукции в проводнике. Вместо проводящего тела можно использовать тело человека, поднеся ладонь руки к шарiku. И, наконец, вместо проводящего тела можно взять любое незаряженное тело из диэлектрика. Тогда из-за явления поляризации в диэлектрике появится притяжение между диэлектриком и заряженным шариком, но эффект будет слабее, чем в случае с проводником.

Задача 11. Два разноименно заряженных шарика притягиваются в воздухе с силой F_1 . Между шариками помещают незаряженный прово-

дящий шар. Как изменится сила, действующая на каждый шарик? Увеличится, уменьшится или останется прежней?

Решение. Из-за явления электростатической индукции на поверхности шара появятся свободные заряды: на стороне, ближайшей к положительно заряженному шарiku, появится отрицательный заряд, а на противоположной стороне шара – положительный заряд. Эти индуцированные заряды создадут дополнительную силу притяжения, действующую на положительно заряженный шарик. Итак, сила притяжения, действующая на положительно заряженный шарик, увеличится. Аналогично, сила притяжения, действующая на отрицательно заряженный шарик, тоже увеличится.

Задача 12. Два разноименно заряженных шарика притягиваются в воздухе с силой F_1 . Между шариками помещают незаряженный шар из диэлектрика. Как изменится сила, действующая на каждый шарик? Увеличится, уменьшится или останется прежней?

Решение. Из-за явления поляризации на поверхности шара появятся связанные заряды: на стороне, ближайшей к положительно заряженному шарiku, появится отрицательный заряд, а на противоположной стороне шара – положительный заряд. Эти связанные заряды создадут дополнительную силу притяжения, действующую на положительно заряженный шарик. Итак, сила притяжения, действующая на положительно заряженный шарик, увеличится. Аналогично, сила притяжения, действующая на отрицательно заряженный шарик, тоже увеличится.