

Рис.5

концентрической полусферой радиусом R и зарядом Q будет равна $2F$. Но эту силу легко вычислить, зная напряженность электрического поля на поверхности боль-

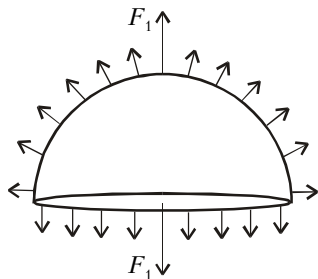


Рис.6

шой полусферы (рис.5):

$$E = k \frac{2q}{R^2},$$

а следовательно, можно вычислить и давление:

$$p = E\sigma,$$

где $\sigma = \frac{Q}{2\pi R^2}$ – поверхностная плотность заряда. Результирующая сила равна по величине силе давления на плоскость, замыкающую полусферу (рис.6):

$$F_1 = \pi R^2 p.$$

Принимая во внимание, что $F_1 = 2F$, получим

$$F = k \frac{qQ}{2R^2} = \frac{qQ}{8\pi\epsilon_0 R^2}.$$

Г.Григорян

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТАТИВ

Дайте мне разбежаться!

С.ВАРЛАМОВ

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ в газе под действием электрического поля, как известно, приводит к возникновению различных типов газовых разрядов. Некоторые из них нашли практическое применение. Так, с помощью дугового газового разряда производят сварку металлических деталей, а газоразрядные лампы используются для освещения помещений и в рекламных целях. Но и огни «святого Эльма», и молнии – это тоже разряды в газе.

Что предшествует началу грозового разряда, т.е. молнии? Как возникает электрическое поле в воздухе? Если вам интересны эти вопросы, прочтите сначала статью «Электрическая машина в атмосфере» в этом номере журнала. А здесь мы обсудим, как движутся заряженные частицы до того, как начнется газовый разряд. Понятно, что эти частицы должны двигаться не так, как нейтральные частицы.

Даже в отсутствие внешнего электрического поля в газах всегда имеются заряженные частицы, концентрация которых мала по сравнению с концентрацией нейтральных частиц – атомов и молекул, если температура ниже 1000 К. Эти заряженные частицы непрерывно образуются под действием космического излучения и излучений радиоактивных веществ и исчезают в результате рекомбинации при встречах частиц с разными знаками зарядов. Если газ поместить в электрическое поле, то под его действием заряженные частицы приобретают (в среднем) дополнительную кинетическую энергию. Эта энергия может быть передана другим частицам при столкновениях.

Электрическое поле заставляет заряженные частицы пробираться сквозь «нестройные» ряды нейтральных частиц и соударяться с ними. Ситуация может быть описана простой моделью: среди плотного газа

нейтральных частиц находится разреженный газ заряженных частиц. Столкновения заряженных частиц друг с другом тоже происходят, но очень редко, и их можно (пока) не рассматривать. В среднем плотность зарядов в газе равна нулю, т.е. концентрации отрицательно и положительно заряженных частиц равны друг другу (нейтральный газ).

Между двумя последовательными столкновениями частицы успевают пролететь некоторое расстояние, которое характеризуется средней длиной свободного пробега λ . Пока заряженная частица летит свободно, она движется с ускорением под действием внешнего электрического поля, в котором находится газ. Если газ имеет низкую температуру, то нейтральные частицы газа перед столкновением с разогнавшейся заряженной частицей можно считать покоящимися.

Упругие столкновения двух частиц (неважно, что одна из них заряжена) происходят так, что энергия между частицами перераспределяется. Пусть масса нейтральной частицы M , а масса заряженной частицы m (меньшая, чем M), тогда за один упругий удар энергичная заряженная частица, имевшая до удара энергию W , передаст нейтральной частице энергию в диапазоне от нуля до $8WmM/(M+m)^2$ (при лобовом столкновении). Проверьте это самостоятельно.

Понятно, что чем меньше масса летающей частицы, тем меньше энергии будет передано второму участнику упругого столкновения. Таким образом, быстрее всего накапливают кинетическую энергию, приобретенную во внешнем электрическом поле, легкие (в сравнении с атомами и молекулами) электроны (они просто при ударах отдают меньше). Нас, конечно же, прежде всего интересуют столкновения легких электронов, имеющих заряд e , с массивными частицами. Средняя энергия, передаваемая электроном нейтральной частице при столкновении, имеет порядок величины Wm/M (точный расчет среднего значения дает дополнительно численный множитель порядка 1.) Хотя в свободном полете между ударами электроны имеют ускорение, направленное только вдоль вектора напряженности \vec{E} , нелобовые удары обеспечивают появление у электронов составляющих скорости и в направлении, перпендикулярном \vec{E} .

Оценим, какую среднюю хаотическую и какую среднюю упорядоченную скорость приобретут электроны при «продавливании» электронного газа сквозь газ нейтральных частиц под воздействием приложенного электрического поля \vec{E} и какой будет их средняя кинетическая энергия. (Предполагаем пока, что ионизация не происходит.)

Примем во внимание, что упорядоченное движение связано с ускорением

$$a = \frac{eE}{m},$$

которое электроны имеют во время свободного полета между двумя последовательными ударами, т.е. в течение времени

$$t = \frac{\lambda}{v_{\text{хаот}}}.$$

Связь между средней упорядоченной и средней хаотической скоростями движения может быть, таким образом, выражена соотношением

$$v_{\text{упор}} = \frac{at}{2} = \frac{(eE/m)\lambda}{2v_{\text{хаот}}}.$$

Пусть в результате направленного движения за время τ электрон сместился от своего начального положения навстречу вектору \vec{E} на расстояние

$$x = v_{\text{упор}}\tau = \frac{(eE/m)\lambda\tau}{2v_{\text{хаот}}}.$$

При этом уменьшение его потенциальной энергии в электрическом поле составило

$$Eex = \frac{(eE)^2 \lambda\tau}{2mv_{\text{хаот}}}.$$

За это же время в результате хаотического движения этот электрон переместился на расстояние y и испытал N столкновений, причем

$$N = \frac{v_{\text{хаот}}\tau}{\lambda}.$$

Имея в среднем энергию

$$W = \frac{mv_{\text{хаот}}^2}{2},$$

электрон при каждом ударе отдавал ее (m/M) -ю часть.

Средняя кинетическая энергия хаотического движения электронов не меняется, а вследствие упорядоченного движения потенциальная энергия каждого электрона в электрическом поле уменьшается. Электроны при соударениях с нейтральными частицами передают им энергию, и газ нагревается. Таким образом, работа сил электрического поля в конце концов идет на повышение температуры газа.

Приравняем величину потерь энергии электрона при ударах уменьшению его потенциальной энергии в электрическом поле:

$$\frac{m}{M} \frac{mv_{\text{хаот}}^2}{2} \frac{v_{\text{хаот}}\tau}{\lambda} = \frac{(eE)^2 \lambda\tau}{2mv_{\text{хаот}}}.$$

Отсюда можно найти среднюю скорость хаотического движения, а затем и среднюю скорость упорядоченного движения электронов:

$$v_{\text{хаот}} = \left(\frac{M}{m}\right)^{1/4} \left(\frac{eE\lambda}{m}\right)^{1/2},$$

$$v_{\text{упор}} = \frac{(eE/m)\lambda}{2v_{\text{хаот}}} = \frac{1}{2} \left(\frac{m}{M}\right)^{1/4} \left(\frac{eE\lambda}{m}\right)^{1/2}.$$

Из полученных формул видно, что средняя скорость хаотического движения электронов в $2(M/m)^{1/2}$ раз больше средней скорости их упорядоченного движения. Даже для такого легкого газа, как гелий, это отношение равно приблизительно 170.

Кинетическая энергия электронов связана, в основном, со средней скоростью их хаотического движения (вклад

упорядоченного движения пренебрежимо мал):

$$W = \left(\frac{M}{m}\right)^{1/2} \frac{eE\lambda}{2}.$$

(Это выражение справедливо, только если $W \cong kT$. Если это не так, то средняя кинетическая энергия движения электронов, согласно классической молекулярно-кинетической теории, конечно же, равна $(3/2)kT$.)

Заметим, что средние кинетические энергии хаотического движения нейтральных частиц и электронов после включения электрического поля значительно различаются. В физике даже вводится специальное понятие – электронная температура:

$$T_{\text{электр}} = \left(\frac{M}{m}\right)^{1/2} \frac{eE\lambda}{3k}.$$

При соответствующем значении напряженности электрического поля E эта величина может быть значительно больше температуры нейтральных частиц.

Мы выяснили, какую энергию приобретают электроны при «продавливании» электронного газа через газ нейтральных частиц под действием внешнего электрического поля. Согласно полученным формулам, средняя кинетическая энергия электронов пропорциональна величине напряженности электрического поля, в котором находится газ, и средней длине свободного пробега частиц в газе (при фиксированной температуре длина свободного пробега частиц обратно пропорциональна давлению газа). Увеличение напряженности электрического поля (или уменьшение давления газа) приводит к тому, что при некотором значении не все удары электронов о нейтральные молекулы будут упругими. И какими будут последствия? Если вам это интересно, прочитайте в этом номере журнала статью

Вниманию наших читателей!

Желающие получить обновленный текст книги А.И.Черноуцана «Физика. Справочник для старшеклассников и абитуриентов» (М.: ЭКСМО-ПРЕСС, 2000), могут найти его на сайте Российского государственного университета нефти и газа им.И.М.Губкина:

<http://www.citde.gubkin.ru/de/demo/physics>

или на сайте Vivos Voco!:

<http://www.vivovoco.nns.ru>

Полный текст книги в PDF-формате занимает примерно 1,2 Мб.