

УДК 537.52

О нетепловой реактивной силе, возникающей при электрическом разряде в системе эмиттирующих электродов

Г. С. Лукьянчиков

Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН, Москва, Россия

Обращено внимание на то, что если удаленные друг от друга разнополярные электроды являются эмиттерами заряженных частиц, то при электрическом разряде (названном ЭРЭ-разрядом) из-за электростатического взаимодействия зарядов электродов с объемным зарядом эмиттированного в пространство тока может возникнуть реактивная сила, толкающая электроды в одном направлении. Отмечено, что исследование ЭРЭ-разряда может открыть путь к созданию универсальных транспортных аппаратов, способных перемещаться и в вакууме, и в средах возможно с более эффективным использованием энергии и более надежных, нежели существующие устройства.

И в вакууме, и в средах возможен такой вид электрического разряда, когда один электрод является эмиттером положительно заряженных частиц, второй — эмиттером отрицательно заряженных частиц при том, что эмиттируемые ими токи равны. Остановимся здесь на таком его виде, когда электроды разнесены на большее в сравнении с их размерами расстояние. Эмиттирующие разнесенные электроды назовем ЭРЭ-системой, а разряд, идущий между ними при эмиссии разнополярных ионов, в условиях, когда появление в значимом количестве иных заряженных частиц исключено, — ЭРЭ-разрядом. Рассмотрим, что может дать ЭРЭ-разряд в одной из возможных областей его применения — создании реактивной силы аппаратов, движущихся в вакууме и в средах.

В ЭРЭ-разряде электрически заряженными частицами могут быть электроны, атомные и молекулярные ионы, ионы Ланжевена (пылинки, крупинки, капельки жидкости) [1]. Но если ЭРЭ-система рассматривается как двигатель, способный работать в плотной среде, то под заряженными частицами здесь понимаются ионы Ланжевена — частицы с наименьшей подвижностью в электрическом поле.

Принцип работы ЭРЭ-системы

Механизм появления реактивной силы поясним на примере помещенной в вязкую среду простейшей уединенной ЭРЭ-системы (рис. 1), состоящей из двух сферических с радиусом r_0 электродов, несущих равные по абсолютной ве-

личине заряды — положительный 1 и отрицательный 2. Эти заряды обеспечивают равные по абсолютной величине потенциалы положительного и отрицательного электродов. Источник постоянного тока, своими полюсами соединенный с электродами, на рис. 1 не показан.

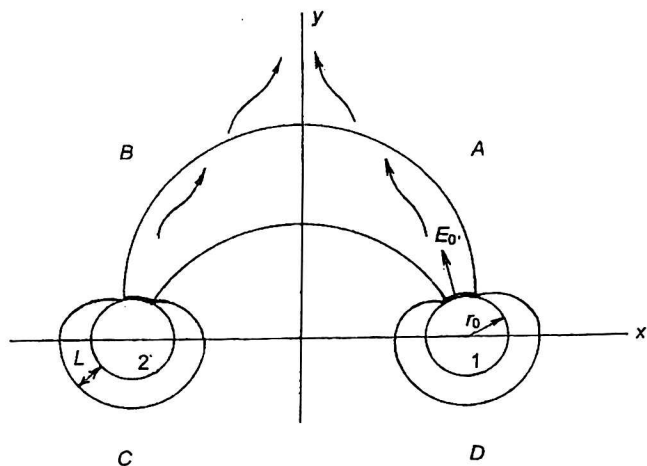


Рис. 1. Картины электрического поля и траекторий частиц

Из участков поверхности этих электродов, где напряженность вырезаемых одной и той же трубкой силовых линий электрического поля E_0 , эмиттируются равные токи частиц с одинаковой по модулю подвижностью. Скорость заряженных частиц v , их подвижность μ и напряженность электрического поля E связаны соотношением

$$v = \mu E. \quad (1)$$

Пусть токи столь малы, а поле электродов столь велико, что основная часть частиц не выходит за границы трубки. В соответствии с (1) они будут двигаться в границах силовой трубки встречными разноименно заряженными потоками, ослабевающими из-за взаимной рекомбинации по мере удаления от их эмиттеров. К плоскости симметрии потоки придут одинаково ослабленными, и суммарная плотность их зарядов здесь, как и в квадрантах С и D, равна нулю. Любая часть потока из электрода 1 в квадранте А прошла меньший путь и меньше ослабла, чем симметричная ей часть потока из электрода 2, поэтому любой заряженный элемент в квадранте А несет положительный заряд. Это же с заменой полярности справедливо и в отношении квадранта В. Размещение разнополярных объемных зарядов зеркально симметрично. Эта симметрия сохранится и при большом токе, когда вещество среды увлекается заряженными частицами, и при размещении ЭРЭ-системы в вакууме. Примерные траектории частиц для этих режимов показаны на рис. 1 волнистыми стрелками. Любой элемент пространства с зарядом той же полярности, что и у электрода, находится ближе к нему, чем зеркальный ему элемент. Это значит, что электроды

всегда отталкиваются от облака эмиттированных ими частиц.

Поле объемного заряда тока у эмиттера E_q противоположно полю электрода. Поэтому ток не может превысить критический ток J_k , при котором $E_q = E_0$. В этом случае эмиттер испытывает наибольшее давление. Поле $E_q = E_0$ оказывает на электрод такое же давление p_m , какое оказывало бы на электрически заряженную плоскость, порождающую поле E_0 ,

$$p_m = 2\epsilon\epsilon_0 E_0^2, \quad (2)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$.

Большее давление, чем p_m , и больший ток, нежели J_k , при данном E_0 получены быть не могут. Вакууму и средам с разными μ одному и тому же значению E_0 отвечают одинаковые p_m , но разные J_k . Наибольшим ток J_k будет в вакууме. В средах он тем меньше, чем меньше μ ; в пределе при $\mu = 0$ $J_k = 0$.

ЭРЭ-система в плотной среде

Самое ценное свойство ЭРЭ-разряда — это его способность электростатически формировать реактивную силу в плотной среде. Для определения практической значимости этого свойства нужно ответить на три вопроса.

1. Какими преимуществами обладает этот метод перед уже используемыми:

- а — выбросом горячего газа;
- б — применением механических винтов?

2. Сколь большим может быть давление p_m , учитывая то, что при превышении критической напряженности поля E_{k1} в среде возникает лавинообразное размножение электронов, образуется плазма, и разряд перестает быть ЭРЭ-разрядом?

3. Сколь велики для поддержания практически значимой величины p_m должны быть j_k — плотность тока J_k и уносимая ежесекундно с 1 м^2 масса — s_k , а также, как соотносятся мощности, затрачиваемые на поддержание единицы силы S (Вт/Н), у ЭРЭ-систем и у современных аппаратов?

Ниже приведены ответы в порядке поставленных вопросов.

1: а — при выбросе разогретого газа теряется тепловая энергия, содержащаяся в горячей выбрасываемой массе. В ЭРЭ-разряде этих потерь нет;

б — лопасти обычных винтов, отталкивая вещество среды плотностью ρ и вязкостью η , работают в режиме, когда число Рейнольдса $Re \gg 1$. Крупинки с зарядом q , отталкиваемые полем E и тоже отталкивающие вещество, из-за своих крошечных размеров r могут иметь $Re \ll 1$. В этом случае скорость проталкивания частицы через вещество определяют по формуле Стокса

$$v = q E / 6\pi\eta r ; \quad (3)$$

$$Re = \nu r \rho / \eta. \quad (4)$$

Подставив (3) в (4) и потребовав $Re \ll 1$, получим условие отсутствия вихрей

$$q E \ll 6\pi\eta^2 / \rho. \quad (5)$$

Для воздуха в нормальных условиях $\eta = 1,7 \cdot 10^{-5}$ (кг/м·с), $\rho = 1,2$ (кг/м³), $E_{k1} \approx 3 \cdot 10^6$ (В/м). Из (5) следует, что при $E < E_{k1}$ вихрей в воздухе не будет, если

$$q \ll 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ (Кл)}. \quad (6)$$

Значит, если эмиттировать частицы, чей заряд по абсолютной величине удовлетворяет (6), то можно ожидать, что затраты энергии при использовании ЭРЭ-системы будут меньше, чем при использовании обычных механических винтов.

Отсутствие высоких температурных и механических нагрузок — еще одно преимущество ЭРЭ-систем. Это может сделать двигатели с ЭРЭ-системами более легкими, надежными и безопасными в сравнении с традиционными.

2. Поля электрода E_0 и объемного заряда E_q противоположны, и если синхронизировать изменение величины E_0 и интенсивность эмиссии частиц так, чтобы всегда выполнялось условие $(E_0 - E_q) < E_{k1}$, то электрический пробой в пространстве над эмиттером никогда не произойдет.

При удалении электродов друг от друга увеличивается пространственная неоднородность поля. Так, если электроды сферы радиуса r_0 разнесены на расстояние $T \gg r_0$, то вблизи электрода, на расстоянии $R \ll T$ от его центра, поле ослабевает по закону, близкому $E_0 \cdot (r_0/R)^2$. Если электрод, за исключением эмиттирующей зоны, покрыт оболочкой толщиной L , как на рис. 1, из вещества со значением пробивной напряженности $E_{k2} > E_{k1}$, то пробой не произойдет ни в теле оболочки, ни в веществе среды, если

$$E_0 < E_{k2}, \quad E_0 < E_{k1}(r_0 + L)^2 / r_0^2.$$

Если $E_{k2} > E_{k1}(r_0 + L)^2 / r_0^2$, то максимальное давление, которое может быть получено на электроде, покрытом оболочкой, будет

$$p_m = 2 \epsilon_0 E_{k1}^2 (r_0 + L)^4 / r_0^4.$$

3. Грубо оценим величины j_k , c_k , S для случая, когда электроды разнесены так далеко, что потенциал электрода относительно свободного пространства φ_0 можно считать равным потенциалу уединенной сферы — $\varphi_0 = E_0 r_0$.

Заряженные частицы с массой m , выходящие из электрода и отталкиваемые от него электрическим полем, передают давление среде, формируя в ней поток вещества среды, который увлекает за собой частицы вдаль от электрода. Обозначим скорость потока v_s , концентрацию

частиц — n . Относительно вещества, движущегося в потоке, частицы дрейфуют в поле электрода в продольном направлении со скоростью v и в поперечном направлении в поле объемного заряда со скоростью v_t . Оценку проведем, считая, что справедливы соотношения

$$v_t \sim v \ll v_s, \quad (7)$$

$$\rho \gg nm. \quad (8)$$

Если имеет место (7), то на отрезке $\sim 2 r_0$ от эмиттера n можно считать неизменной. При оценке будем считать, что в потоке концентрация n такая же, как в слое толщиной r_0 , прилегающем к поверхности электрода и создающем у этой поверхности поле E_q , такое же, что создают частицы в потоке, т. е.

$$n = 2\epsilon_0 E_q / q r_0. \quad (9)$$

Сила электростатического давления на единицу поверхности эмиттера p равна силе, приложенной в противоположном направлении через частицы к веществу среды. Под действием этой силы часть потока, проходящая через сечение единичной площади, ежесекундно увеличивает количество движения на величину ρv_s^2 (массой заряженных частиц в соответствии с (8) пренебрегаем). Поэтому

$$p = \rho v_s^2. \quad (10)$$

Для случая $E_q = E_0$ из (2) и (10) следует

$$v_s \approx E_0 \sqrt{(2\epsilon_0 / \rho)} \quad (11)$$

или

$$v_s \approx \varphi_0 r_0^{-1} \sqrt{(2\epsilon_0 / \rho)}. \quad (12)$$

Учитывая (7), $j_k \approx q n v_s$, и используя (9) и (11, 12), получим

$$j_k \approx E_0^2 (2\epsilon_0)^{3/2} / (r_0 \rho^{1/2}) \quad (13)$$

или

$$j_k \approx \varphi_0^2 (2\epsilon_0)^{3/2} / (r_0^3 \rho^{1/2}).$$

Очевидно, что

$$c_k = j_k m / e. \quad (14)$$

Разделив $j_k \varphi_0$ на p_m , получим S (что совпадает с (11) и (12))

$$S = E_0 \sqrt{(2\epsilon_0 / \rho)}. \quad (15)$$

Считая, что поперечное поле объемного заряда столь же велико, как и продольное, направленное к эмиттеру и равное E_0 , и сравнивая скорости v и v_t со скоростью v_s , даваемой (11), а также учитывая (9), найдем условия, при выполнении которых будут получены неравенства (7) и (8)

$$\mu \ll \sqrt{(2\epsilon_0 / \rho)}, \quad \rho \gg 2\epsilon_0 E_0 m / (r_0 q).$$

Пример: $r_0 = 1$ (м), $E_0 = 3 \cdot 10^6$ (В/м), среда — воздух ($\epsilon = 1$, $\rho = 1,2$ (кг/м³)). В качестве эмитти-

руемых частиц используются ионы Ленжевена с $\mu \sim 10^{-7}$ (м²/с·В), $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ (К), $m = 10^{-20}$ (кг).

Из (2), (9), (11), (13), (14), (15) получим $p_m \approx 160$ (Н/м²); $n \approx 3 \cdot 10^{14}$ (м⁻³); $v_s \approx 11,5$ (м/с); $j_k \approx 2 \cdot 10^{-4}$ (А/м²); $c_k \approx 10^{-6}$ (кг/м²·с); $S = 11,5$ (Вт/Н).

Из приведенного примера следует, что для получения практически значимого давления ~ 160 (Н/м²) нужно эмиттировать ток, как представляется, вполне реализуемой плотности при весьма скромной потере массы.

Современные вертолеты [2], работающие в режиме, когда подъемная сила, приходящаяся на единицу "ометаемой" винтом площади, равна полученному в примере значению p_m , имеют примерно такое же, что и в примере, но несколько худшее значение S .

ЭРЭ-системы для транспортных аппаратов

В ЭРЭ-системах возможно использование электродов разных форм, а не только близких к сфере. Так, они могут быть параллельными цилиндрами. В качественном отношении картины электрического поля и траекторий частиц в поперечном сечении таких систем будут близки представленным на рис. 1. Это относится и к ЭРЭ-системам с тороидальными соосными электродами, лежащими в одной или параллельных плоскостях, при условии, что кратчайшее расстояние между торами много меньше их больших радиусов. Они тоже пригодны для получения реактивной силы, поскольку факторы, приводящие к ее появлению, здесь присутствуют в той же мере. Наиболее простой ЭРЭ-системой, обеспечивающей наибольшую площадь эмиттирующих зон, представляется система, где электроды (1, 2, 3) опоясывают аппарат (рис. 2).

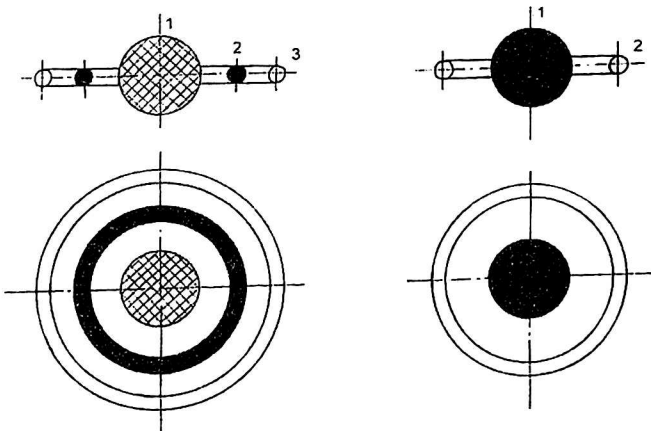


Рис. 2. ЭРЭ-системы для транспортных аппаратов

Проблемы, требующие решения

Несмотря на достоинства аппаратов с ЭРЭ-системами, вывод об их перспективности и реализуемости может быть сделан лишь после проведения серьезных как экспериментальных, так и теоретических исследований ЭРЭ-разряда.

В экспериментальной сфере основной видится проблема создания эмиттеров заряженных частиц, способных работать в плотных средах.

Представляются три возможных направления в создании таких эмиттеров. В полости внутри электрода ЭРЭ-системы можно расположить высоковольтный электрод. Из него могут выбрасываться макрочастицы, которые, попав в полость, окажутся носителями заряда того знака, что и заряд внутреннего электрода. Возможен и другой вариант, когда в полости зажигается коронный разряд [3]. В обоих случаях заряженные частицы могут поступать в свободное пространство через отверстия, соединяющие его с полостью.

Наконец, возможно использование эмиссии ионов щелочных металлов с нагреваемой поверхности [4].

В теоретических исследованиях основными являются задачи определения КПД системы, величины критических токов, нахождения соотношений между силой эмиттируемых токов и силой, действующей при этом на электроды разных типов, выявления оптимальных форм электродов. Представляется, что решение этих задач для ЭРЭ-систем является делом значительно более трудным, чем решение аналогичных задач для уже существующих устройств, в которых также задействованы потоки заряженных частиц [5]. Так, более сложными являются граничные условия, которые задают разнесенные в свободном пространстве электроды, в сравнении с тем, что имеет место в существующих устройствах, где частицы движутся в камерах простой геометрической формы [5]. Если же ЭРЭ-разряд протекает не в вакууме, а в среде, то задача усложняется еще сильнее необходимостью учета движения вещества среды, увлекаемого дрейфующими в электрическом поле частицами и, в свою очередь, увлекающего их. Кроме того, при большом эмиттируемом токе, когда поле пространственного заряда у поверхности электрода становится соизмеримым с полем самого электрода, нельзя считать распределение заряда по поверхности электродов и поле, создаваемое им, известными и не зависящими от зарядов, находящихся вне электродов, как полагалось в работе [5].

Заключение

Из изложенного вытекает универсальность, "вездеходность" аппаратов с ЭРЭ-системами, которые, по-видимому, смогут работать и в вакууме, и в средах, и, кроме того, в обоих этих случаях могут оказаться более энергоэкономичными, надежными и безопасными в сравнении с существующими аппаратами.

Учитывая, что принципиальных препятствий к осуществлению аппаратов с ЭРЭ-системами не просматривается, исследования по ЭРЭ-разряду — начальному этапу на пути к их созданию — можно признать перспективными.

Автор благодарит А. А. Рухадзе и участников руководимого им семинара за плодотворные обсуждения; К. Ф. Сергейчева, И. А. Косого и С. И. Грицинина за поддержку, оказанную вовремя и в нужной форме, а также Г. М. Батанова, А. С. Сахарова и В. А. Иванова, сделавших полезные замечания.

Л и т е р а т у р а

1. Энгель А. Ионизированные газы. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1959.
2. Стасенко А. Л. Физика полета. — М.: Наука, 1988.
3. Thomson J. J., Thompson G. P. Conduction of Electricity Through Gases. — New York, Dover Publ., 1969.
4. Баткин В. И., Савченко О. Я. //ЖТФ, 2002, Т. 72. № 5. С. 91—95.
5. Рухадзе А. А., Богданкевич Л. С., Росинский С. Е., Рухлин В. Г. Физика сильнооточных релятивистских электронных пучков. — М.: Атомиздат, 1990.

Nonthermal reactive force arising under electrical discharge in the system of emitting electrodes

G. S. Luk'yanchikov

Research-technology Center PLASMAIOFAN, Moscow, Russia

It is studied that if far separated electrodes one from other are emitters of charged particles of opposite signs the specific discharge arising in ambient medium, named ESE discharge, occurs. A reactive force can result from the electrostatic interaction of the electrodes and space charges of the emitting-to-medium current with the force in the same direction. The ESE discharge study offers the way for creation of conveyance means both in space and in different media. It is possible that the means will be more energy effective and more reliable than existing facilities.