

Коронно-разрядный дипольный двигатель

М. К. Болога, Ф. П. Гросу, В. Д. Шкилев, И. В. Кожевников, А. А. Поликарпов

Институт прикладной физики АН Молдовы,

ул. Академическая, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, e-mail: mbologa@phys.asm.md

Описываются конструкции и принцип действия малогабаритного двигателя электростатического типа, представляющего собой ротор в виде тонкостенного диэлектрического цилиндра. Вдоль двух диаметрально противоположных образующих цилиндра по поверхности симметрично предусмотрены две полоски металлической фольги, зазор между продольными кромками которых варьируется. Аналогично, диаметрально противоположно и параллельно образующим цилиндра, расположены два электрода в виде тонких жестких пластинок с заостренными кромками – лезвиями, обращенными к поверхности цилиндра. Расстояния от острий-лезвий до поверхности цилиндра варьировались. Устройство питается от источника высокого постоянного напряжения, обеспечивающего биполярный симметричный коронный разряд. Приводятся экспериментальные зависимости числа оборотов двигателя от напряжения на электродах при различных геометрических параметрах. Получены уравнения регрессии и построены их пространственные графические зависимости. Теоретически обосновывается принцип действия двигателя, обсуждаются экспериментальные и теоретические результаты.

Ключевые слова: двигатель, коронный разряд, число оборотов, напряжение, дипольный момент, электрическое поле, крутящий момент, электрический заряд, сила тока, электрическая емкость, электрическое сопротивление.

УДК 621.319.3

ВВЕДЕНИЕ

В связи со стремительным развитием новых отраслей знаний современных и перспективных технологий возникает необходимость в обосновании и разработке комплекса элементов и аппаратуры: миниатюрных теплообменников, термостатов, двигателей, насосов и т.д. В этом аспекте обсуждаются принцип действия и особенности работы модели малогабаритного двигателя, который найдет различные применения, в том числе в специфических условиях замкнутых объемов, варьирования давления и температуры технологических агентов. Устройство можно отнести к классу электростатических, поскольку его действие основано на взаимодействии дипольного электрического момента ротора с внешним электрическим полем. При этом электрический заряд диполя создается за счет тока коронного разряда, в связи с чем двигатель назван коронно-разрядным. Термин «дипольный» отражает тот факт, что ротор с физической точки зрения представляет собой электрический диполь, вращающийся под действием внешнего электрического поля.

Несмотря на значительное количество патентов на электростатические двигатели, по признанию исследователей, существенным тормозом на пути развития тематики является недостаток данных по физике процессов, описывающих вращение ротора двигателя и его взаимодействие со «статором». В отдельных работах [1, 2] рассматриваются различные конструкции

электростатических двигателей, проводится аналогия [2] между работой электростатического двигателя и работой идеальной тепловой машины Карно с точки зрения термодинамики преобразования электрической и тепловой энергии в механическую.

Практически отсутствуют теоретические обоснования механизма функционирования электростатических двигателей. В одной из редких работ [3], посвященной открытию нового физического явления – «вращения тел в электрическом поле движущихся зарядов», анализируется вращение различных шаров, установленных между электродами, соединенными с противоположными полюсами электрофорного генератора. При подаче на электроды (25–35) кВ между ними образуется поток движущихся частиц, известный как «электрический ветер» (ЭВ), обнаруженный в XVIII веке Бенджамином Франклином. Утверждается, что вращение шара обусловлено вовлечением его ионизированным воздухом в круговую циркуляцию. На основе этого утверждения проведены эксперименты с различными покрытиями поверхности шара (полимерным флоком, формирующим шероховатую поверхность, и угольной смазкой, создающей гладкую проводящую поверхность). Скорость вращения при этом не превышала 2 об/сек. Снижение давления в камере приводило к уменьшению скорости вращения вплоть до остановки.

Для доказательства незначительного влияния электрического ветра [4] на движение шара на

внутренней поверхности статора, между коронирующими электродами, радиально устанавливались пластины из диэлектрического материала, которые исключали циркуляцию воздуха вокруг ротора. В результате последний стал вращаться со скоростями намного больше скорости электрического ветра, которая, по оценочным расчетам, не превышает 2 м/сек. Однако ни экспериментального, ни теоретического исследования наблюдаемых явлений не приводится.

В предлагаемой работе исследована физическая модель электростатического двигателя, названного «коронно-разрядным» (КРД), принцип действия которого базируется на явлении коронного разряда, но не на электрическом ветре.

КОНСТРУКЦИЯ ДВИГАТЕЛЯ И ПРИНЦИП ЕГО ДЕЙСТВИЯ

Конструктивная сущность КРД состоит в следующем. Ротор (основная деталь двигателя) представляет собой тонкостенный диэлектрический цилиндр диаметром $D = 2r_0 = 80$ мм, длиной $L = 120$ мм и общей массой $m = 27,5$ г. Вдоль двух диаметрально противоположных образующих цилиндра симметрично наклеены две полоски 1 металлической фольги, каждая длиной $L_0 = 80$ мм и шириной a , диэлектрический зазор 2 между продольными кромками равен b , так что $2a + 2b = 2\pi r_0$. Также диаметрально противоположно, симметрично и параллельно образующим цилиндра расположены два электрода в виде тонких жестких пластинок 3 с заостренными кромками – лезвиями, обращенными к поверхности цилиндра. Расстояния от острий лезвий до поверхности последнего по нормали равны $d_1 = d_2 \equiv d$ (рис. 1).

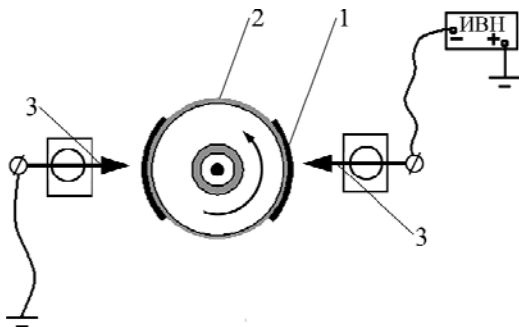


Рис. 1. Коронно-разрядный двигатель: 1 – полоски фольги; 2 – диэлектрический зазор; 3 – коронирующие электроды.

Питается устройство от источника высокого постоянного напряжения, обеспечивающего биполярный симметричный коронный разряд. При подаче на электроды высокого постоянного напряжения U и достижении определенной критической величины $U_{кр}$ возникает коронный разряд, и цилиндр, насаженный на неподвижную ось, начинает вращаться, выполняя функцию

ротора двигателя. Роль статора играют жесткие высоковольтные коронирующие электроды-лезвия 3 , выполняющие одновременно и функцию электродов, создающих *внешнее* по отношению к ротору постоянное электрическое поле напряженностью \vec{E} (рис. 1). Таким образом, статор – это электроды «плюс», созданное ими внешнее электрическое поле, приводящий «диполь-ротор» (электрически заизолированного от других частей КРД) во вращательное движение.

Чтобы понять принцип действия двигателя, следует отметить некоторые его характерные особенности. Во-первых, он работает только после возникновения коронного разряда во внешней электрической цепи, что и понятно, ибо это условие напрямую говорит о наличии расхода электроэнергии ($I \cdot U \neq 0$), за счет которой возможно получение механической энергии. Во-вторых, предположение о кажущейся возможности вращения цилиндра «электрическим ветром» (ЭВ) от коронирующих электродов с очевидностью отпадает в силу полной симметрии коронирующей системы электродов и создаваемых ею электрогидродинамических (ЭГД) потоков, а следовательно, и равенству нулю результирующего механического момента, вызываемого этими потоками. В-третьих, оказывается, что, если отсутствуют металлические полоски на поверхности цилиндра (то есть для чисто диэлектрического цилиндра), эффект вращения также существует, однако он гораздо слабее и менее устойчив. Эти обстоятельства дают основания полагать, что решающую роль в наблюдаемых явлениях играет *коронный разряд*, который, будучи биполярным, электрически заряжает поверхность цилиндра с двух противоположных сторон зарядами противоположных знаков, создавая таким образом на цилиндре *дипольный электрический момент* \vec{P}_e , механически неустойчивый, противоположный внешнему электрическому полю \vec{E} , то есть $\vec{P}_e \uparrow \downarrow \vec{E}$. При этом существенно, что накапливаемый на диэлектрической поверхности ротора заряд имеет конечную скорость релаксации [5], благодаря чему взаимодействие ротора со статором оказывается достаточным для приведения ротора во вращательное движение. Отсюда, кстати, вытекает, что ротор должен быть диэлектрическим. Информацию о самом процессе накопления зарядов на поверхностях, являющихся границами раздела (правда, текучих сред) в электрическом поле, а также вопросы механической устойчивости этих границ можно найти в работах [6, 7]. Что касается наличия металлических наклеек 1 (см. рис. 1) на поверхности цилиндра и значительного усиления от этого наблюдаемого эффекта, то следует отметить, что

они вносят лишь количественные изменения в наблюдаемое явление, а важная роль при этом должна отводиться непосредственной (емкостной) зарядке диполя. Факт существования эффекта и при отсутствии металлических полосок свидетельствует о значительной роли и объемного заряда, сопровождающего коронный разряд. Дипольный электрический момент $\vec{P}_e = q \cdot \vec{l}$, где $q > 0$ – инжектируемый одноименный заряд на поверхность цилиндра, не наведенный, которым будем пренебрегать; \vec{l} – вектор-плечо момента. Суммарный заряд с максимальной объемной и поверхностной плотностями в условиях неподвижности ротора, очевидно, расположен напротив коронирующих электродов, а нулевой – по бокам, при углах $\pm \pi/2$ от положения максимумов, образует электрический распределенный диполь, вектор-плечо которого равно по величине расстоянию между центрами «тяжести» отрицательных и положительных зарядов, очевидно, находящихся на некоторых расстояниях от внутренней поверхности к центру цилиндра. Крутящий механический момент силы, действующий на ротор, выражается общей векторной формулой:

$$\vec{M} = \vec{P}_e \times \vec{E} = q \cdot \vec{l}_e \times \vec{E}. \quad (1)$$

Для того чтобы крутящий момент приводил к вращению ротора, необходимо, чтобы при возможном угловом перемещении $\delta\vec{\varphi}$, в соответствии с общим принципом Рэлея [8], механическая работа была бы положительной:

$$\delta A = \vec{M} \cdot \delta\vec{\varphi} > 0. \quad (2)$$

В свою очередь, как показано в [9], это означает, что дипольный момент должен быть противоположным внешнему полю, что равносильно отрицательности скалярного произведения:

$$\vec{P}_e \cdot \vec{E} < 0. \quad (3)$$

Казалось бы, приведенные формулы (1)–(3) объясняют вращение ротора только на пол оборота, так как при этом достигается положение, когда дипольный момент \vec{P}_e должен стать противоположным по направлению, что, как нетрудно убедиться, в дальнейшем должно приводить к торможению движения. В действительности уже после четверти оборота, благодаря встречному коронному разряду от противоэлектрода, фактически начнется процесс перезарядки диполя, так что ситуация, описываемая формулами (1)–(3), будет повторяться применительно к противоположному электроду. Таким образом, процесс «зарядки-перезарядки» диполя предопределяет саму возможность существования непрерывного одностороннего вращения ротора двигателя. В то же время может возникнуть вопрос, а что если вместо коронного разря-

да применить металлические щетки. Принципиально ничего не изменится, однако при замене коронного разряда щетками устраняется внешнее электрическое поле ($\vec{E} = 0$), без которого исчезнет и момент сил (1). Следовательно, имеются все основания полагать, что именно в условиях коронного разряда двигатель работоспособен, что было показано экспериментально.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проводились измерения частоты оборотов двигателя при различных зазорах b между проводящими полосками, напряжениях на электродах U и расстояниях d от лезвий коронирующих электродов до поверхности ротора. Методика измерений основывалась на фиксировании числа световых импульсов с помощью светодиода, прошедших в единицу времени через два противоположных отверстия в основаниях ротора. Число таких импульсов совпадает с числом оборотов в секунду n . Одновременно фиксировались напряжения, при которых начиналось вращение ротора, а также предпробойные напряжения, когда коронный разряд начинал переходить в искровую.

На рис. 2 представлены зависимости частоты оборотов двигателя от напряжения при различных зазорах b и фиксированном расстоянии от коронирующих электродов до поверхности цилиндра $d = 5$ мм. Оптимальный зазор b_0 между проводящими наклейками, при котором достигается максимальная частота вращения двигателя $n_{\text{макс}} \approx 28$ об/с, составляет ≈ 60 мм. Кроме того, заметна почти линейная зависимость частоты вращения от напряжения питания двигателя U , а также просматривается наличие максимума числа оборотов в зависимости от величины промежуток b .

Для лучшего представления зависимости $n(U, b)$ методом наименьших квадратов с помощью статистической компьютерной обработки опытных данных рис. 2 получено двумерное квадратичное уравнение регрессии:

$$n(U, b) = -12,67 + 2,3U - 0,9435b - 0,093U^2 + 0,084Ub - 0,0127b^2, \quad (4)$$

из которого видно, что действительно приближенно происходит линейный рост частоты вращения с увеличением напряжения, ибо член второго порядка $\sim U^2$ существенно меньше линейных по U .

Пространственный график зависимости (4) приведен на рис. 3, где черные точки соответствуют точкам на рис. 2. Единицы измерения и в формуле (4), и на всех графиках одинаковые: $[n]$ – об/с; $[U]$ – кВ; $[b]$ – мм. Из графика видно,

что на плоскости $U = \text{const} \approx 33$ кВ (в том числе согласно рис. 2), в области $b \sim 60$ мм, на самом деле просматривается условный максимум функции $n(U, b)$, который легко уточнить, приравняв частную производную по b нулю при $U = 33$ кВ. Получим $b \approx 71$ мм, а $n_{\text{max}} \approx 28$ об/с, что в пределах ошибок эксперимента и теоретических оценок вполне согласовано. Кстати, несовпадение $b \approx 71$ мм с $b \approx 60$ мм не удивительно, так как при $b \approx 71$ мм эксперимент не проводился. Поэтому, возможно, это значение более оптимально (см. рис. 2, 3).

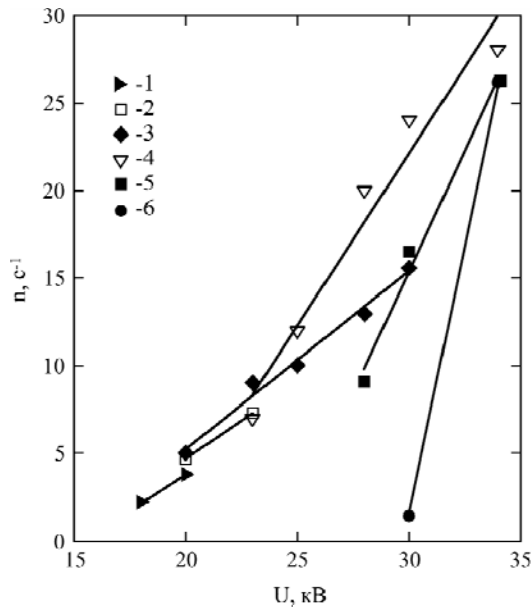


Рис. 2. Зависимость частоты оборотов от напряжения при различных зазорах между полосками на поверхности ротора b (мм): 1 – 10; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80; 6 – 100.

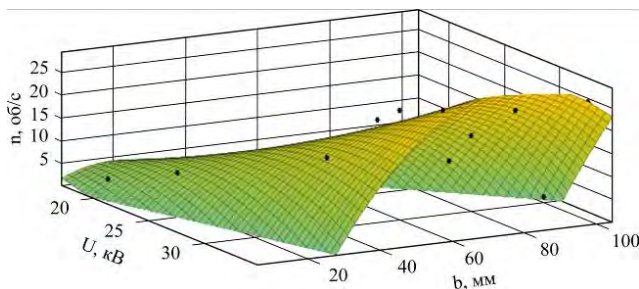


Рис. 3. График функции $n(U, b)$ для уравнения регрессии (4).

Значительное влияние на скорость вращения ротора оказывает и параметр d . На рис. 4 приведена зависимость частоты вращения двигателя от напряжения при различных зазорах d между коронирующими электродами и поверхностью ротора.

По мере уменьшения d увеличивается скорость вращения ротора, но уменьшается значение напряжения, с которого меняется режим разряда с коронирующего на искровой, возрастают потери электрической энергии, снижается эффективность двигателя. Определено оптимальное значение $d_0 = 3$ мм. Оптимальное

число оборотов в секунду составляет около 30, достигнутое максимальное значение частоты оборотов – 33 при напряжении 35 кВ (на рис. 2, 4 не отражено).

Как следует из рис. 4, обнаруживаются те же линейные зависимости, что и в случае рис. 2. Поэтому основной вывод из приведенных экспериментальных результатов таков: имеет место практически линейная зависимость частоты оборотов КРД от напряжения питания двигателя.

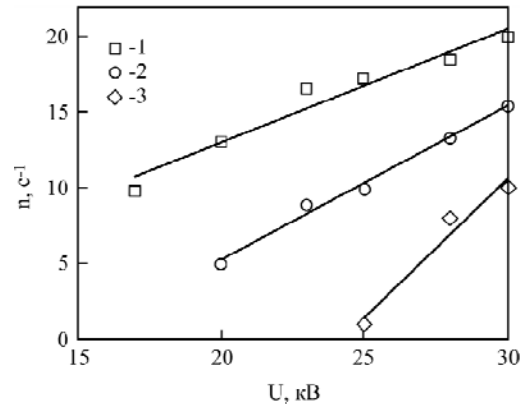


Рис. 4. Зависимость частоты оборотов от напряжения при различных зазорах между коронирующими электродами и поверхностью ротора (мм): 1 – 3; 2 – 5; 3 – 10 ($d_1 = d_2 = d$).

Как и при зависимости $n(U, b)$, на основе обработки экспериментальных данных графика рис. 4 находим уравнение регрессии:

$$n(U, d) = 8,031 + 1,665U - 9,56d - 0,03119U^2 + 0,186Ud + 0,2041d^2. \quad (5)$$

На основе численных оценок можно убедиться, что в первом приближении квадратичным по напряжению членом можно пренебречь, и тогда получим снова линейную зависимость частоты оборотов от напряжения, то есть этот вывод носит конечный общий характер. Более полное представление о пространственной зависимости функции двух переменных $n(U, d)$ можно получить с помощью графика рис. 5, из которого видно, что явно выраженных точек, «подозрительных» на экстремум, не просматривается. Поэтому на данном этапе исследования можно не вдаваться в более детальный анализ условий на экстремум рассматриваемых задач.

Относительно геометрических зазоров b и d подчеркнем, что чем они меньше, тем при меньшем напряжении U возникнет коронный разряд, то есть тем меньше $U_{\text{кр}}$. Крутизна роста частоты оборотов двигателя с напряжением возрастает с увеличением параметра b , достигает максимума, затем начинает падать. Таким образом, выявляется оптимальный режим явления: $b \approx (60-70)$ мм, что уже отмечалось. Согласно рис. 4, также замечаем, что увеличение зазора между коронирующими электродами и поверх-

ностью ротора приводит к сдвигу зависимостей $n(U)$ вправо и к увеличению $U_{кр}$, что представляется очевидным.

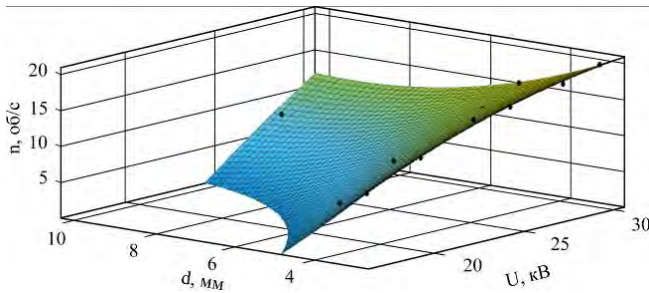


Рис. 5. График функции $n(U, d)$ по уравнению регрессии (5).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Объяснения экспериментальных зависимостей, представленных на рис. 2, 4, в общих чертах могут быть интерпретированы, исходя из простых физических соображений, а также уравнений и графиков функций $n(U, b)$ и $n(U, d)$, представленных на рис. 3 и 5.

Сначала остановимся на вопросе, почему зависимости на рис. 2, 4 начинаются при тем меньших напряжениях $U_{кр}$, чем меньше зазоры b и d . Дело в том, что разряд является как бы двухкаскадным: первый каскад – между «плоскими» коронирующими иглами 3 и металлическими полосками на поверхности цилиндра 1 (по зазору d) и второй – между противоположными кромками полосок по диэлектрической поверхности 2 (участку b). Естественно, чем меньше зазор b , тем меньше его омическое сопротивление и $U_{кр}$, о чем и свидетельствует рис. 2. То же самое относится и к зазору на рис. 4: чем он меньше, тем меньше $U_{кр}$ в силу простого уменьшения межэлектродного расстояния.

Наличие максимума в зависимости $n(b)$ в первом приближении объяснимо не только качественно, но и количественно. При установившихся режимах вращения крутящий момент (1) уравнивается моментом сил сопротивления трения, который по аналогии со случаем вязкого трения принимаем линейным по угловой скорости $\omega = 2\pi n$, то есть

$$\omega \sim n \sim M \sim P_e \sim q = C \cdot U_C, \quad (6)$$

где U_C – напряжение между полосками, как на конденсаторе; C – его электрическая емкость, очевидно, пропорциональная их площади, которая в свою очередь пропорциональна длине: $C \sim a = \pi r_0 - b$. С другой стороны, если омическое сопротивление диэлектрических зазоров (обоих) равно R , то оно, очевидно, пропорционально ширине зазора b , то есть $R \sim b$. Причем это сопротивление оказывает на конденсатор шунтирующее действие. Следовательно, конденсатор находится под напряжением:

$$U_C = U_R = I \cdot R \sim R \sim b,$$

где I – сила тока. С учетом приведенных соотношений из (6) следует

$$n \sim C \cdot U_R \sim C \cdot R \sim a \cdot b = (\pi r_0 - b) \cdot b. \quad (7)$$

Отсюда видно, что имеется максимум числа оборотов двигателя при зазоре, равном одной четверти длины окружности цилиндра:

$$b = (1/4) \cdot \pi D. \quad (8)$$

При диаметре ротора, используемого в экспериментах, $D = 80$ мм для оптимальной ширины диэлектрического зазора получим $b \approx 63$ мм, весьма близкое к экспериментально оцененному $b \approx 60$ мм. Этот результат следует рассматривать и как хорошее подтверждение формулы для заряда диполя, вытекающей из (6):

$$q = C \cdot U_R = C \cdot I \cdot R. \quad (9)$$

Саму линейную зависимость частоты вращения двигателя от подаваемого на него напряжения U , которая, как увидим ниже, не совсем линейная, можно объяснить, исходя из соотношений:

$$n \sim M \sim P_e \cdot E \sim q \cdot E \sim (C \cdot U_R) \cdot U. \quad (10)$$

Представляется, что в равенстве $U_R = I \cdot R$ с ростом U , то есть и силы тока I , уменьшается сопротивление зазора R из-за уменьшения сопротивления воздушной ионизированной прослойки, примыкающей к поверхности диэлектрика. Тогда $U_R \approx \text{const}$ и выражение (10) переходит в $n \sim U$, о чем и свидетельствуют рис. 2, 4.

В дальнейшем целесообразно рассмотрение усложненных конструкций КРД с обсуждением вопросов их практического применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jefimenko O. *Electrostatic Motors: Their History, Types and Principles of operation*. New revised edition. edited by Thomas Valone. Beltsville, MD: Integrity Research Institute, 2011. 159 p.
2. Верхозин А.И. Электростатический двигатель как термодинамическая система с двумя степенями свободы. *Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки*. 2013, (3), 141–148.
3. Дюдкин Д.А. Открытие нового физического эффекта: «Явление вращения тел в электрическом поле движущихся зарядов». *Физика сознания и жизни, космология и астрофизика*. 2007, (1), 52–59.
4. Бушуев В.А., Комаровский Л.И., Лопатко В.И. *Диэлектрический двигатель*. Патент SU №1294265.
5. Остроумов Г.А. *Взаимодействие электрических и гидродинамических полей*. М.: Наука, 1979. 319 с.

6. Мельчер Дж., Тейлор Дж. *Механика. Периодический сборник иностранных статей*. М.: Мир, 1971. Вып. 5, с. 68.
7. Жакин А.И. Электрогидродинамика заряженных поверхностей. *УФН*. 2013, 183(2), 153–177.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Гидродинамика*. М.: Наука, 1988. 733 с.
9. Гросу Ф.П., Болога М.К. Электроконвективное вращение диэлектрической жидкости во внешних электрических полях. *ЭОМ*. 2010, 46(1), 48–53.

Поступила 27.01.15

Summary

The construction and operation of a small-sized electrostatic engine are described. It consists of a rotor in the form of a thin-walled cylinder made from a dielectric material. There are two strips of metal foil along two diametrically opposite generatrices of the cylinder. The

gap between the longitudinal edges of the strips can be varied. Similarly, two electrodes, in the form of thin rigid plates with sharp edges and facing the cylinder surface, are arranged diametrically opposed to each other and parallel to the generatrices of the cylinder. Distances from sharp edges to the surface of the cylinder have been varied. The device is powered by a high voltage DC source providing a symmetrical bipolar corona discharge. Experimental dependences of the engine speed on the voltage between the electrodes for different geometrical parameters are given. Regression equations are deducted and presented in a graphical form. Theoretical substantiation of the engine operation principle is given and experimental and theoretical results are discussed.

Keywords: engine, corona discharge, rotation speed, voltage, dipole moment, electric field, torque, electrical charge, current, electrical capacitance, electrical resistance.