

# Физическая аппаратура

УДК 537.39

## Летательные аппараты, реактивная сила которых создается электрически заряженными микрокапельками

Г. С. Лукьянчиков, Т. Р. Хазиев

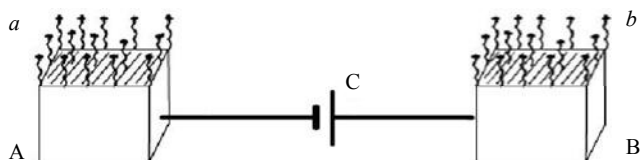
*Рассмотрен в плотной воздушной среде новый тип реактивного двигателя, состоящего из эмиттера электрически заряженных водяных капелек и многосеточной электродной системы, в которой поток этих капелек движется в постоянном продольном электрическом поле, инициируя появление воздушного потока. Оцениваются величина создаваемой потоком реактивной силы и коэффициент преобразования энергии электрического тока в энергию воздушного потока. Показано, что такой метод получения движущей силы с использованием топливных элементов позволяет снизить расход энергии в несколько раз по сравнению с современными летательными аппаратами. Приведена возможная схема летательного аппарата. Обсуждены особенности и ожидаемые достоинства и недостатки таких аппаратов.*

PACS: 88.85Hj

*Ключевые слова:* реактивная сила, электрический разряд, электрически заряженные капельки.

### Введение

В работах [1, 2] обращено внимание на то, что система, состоящая из источника постоянного тока  $C$  и двух разнополярных электродов  $A$  и  $B$ , эмитирующих равные токи соответственно заряженных частиц, обладает важным свойством, отсутствующим у системы с одним эмитирующим электродом, а именно, в механическом отношении такая система не является замкнутой (рис. 1).



**Рис. 1. Схема ЭРЭ-системы:**

$a$  — поток отрицательных частиц;  $A$  — отрицательный электрод;  $b$  — поток положительных частиц;  $B$  — положительный электрод

Если отрицательный и положительный электроды относительно окружающего пространства

обладают потенциалами  $-U_1$  и  $U_2$ , соответственно, и каждый из них эмитирует ток  $I$ , то в свободное пространство будут уходить два потока вещества. В одном потоке движущая масса будет нести отрицательный электрический заряд, в другом — положительный. Мощность, затрачиваемая на поддержание отрицательного и положительного потоков, равна  $IU_1$  и  $IU_2$ , соответственно. Суммарная мощность затрачиваемая системой равна  $IU$ , где  $U = |-U_1| + U_2$  — разность потенциалов между электродами. Таким образом, видно, что система с двумя эмитирующими электродами способна преобразовывать электрическую энергию, вырабатываемую источником питания, в кинетическую энергию выбрасываемой наружу массы, например, в виде потока заряженных *макрочастиц*.

Отметим, что в электрическом отношении система с двумя эмитирующими электродами является такой же замкнутой, как и система с одним эмиттером. Действительно, суммарный электрический заряд вещества, выбрасываемого наружу, равен нулю. Кроме того, как и в непрерывно работающей системе с одним эмиттером, сила технического тока, выходящего из одного полюса источника питания, равна силе технического тока, входящего в другой его полюс. Иными словами, если в электрической цепи системы с одним эмиттером через источник питания протекает некий ток, то и в цепи с двумя разнополярными эмиттерами через источник питания будет протекать точно такой же ток, если токи, эмитируемые каждым из этих разнополярных эмиттеров, по абсолютной величине равны току, эмитируемому в системе с одним эмиттером.

**Лукьянчиков Геннадий Семенович**, старший научный сотрудник.

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел. (499) 503-83-82. E-mail: genluk1@rambler.ru

**Хазиев Тимур Робертович**, аспирант.

МЭИ (Технический университет).

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14.

Статья поступила в редакцию 20 июля 2011 г.

© Лукьянчиков Г. С., Хазиев Т. Р., 2012

Если эмитирующие поверхности электродов А и В (см. рис. 1) обращены в одну сторону, то все эмитированное вещество отбрасывается в одну сторону, создавая реактивную силу. Электроды А и В можно разнести друг от друга на большое расстояние, задав потенциалы относительно и друг друга, и свободного пространства столь высокими, чтобы обеспечить частицам с массой  $m$  и зарядом  $q$  высокие скорости при очень малой величине  $q/m$ . Устройство с *эмитирующими разнесенными электродами* названо ЭРЭ-системой, а электрический разряд при эмиссии разнополярными электродами равных токов — ЭРЭ-разрядом.

Если предположить, что эмитируемая макро-частица имеет заряд  $q$  и массу  $m \sim 10^6 \cdot qM/e$  (где  $M$  — масса молекулы, например, воды, а  $e$  — заряд электрона), то нетрудно показать, что при потенциалах электродов порядка 1 МВ скорость этой макро-частицы превысит скорость истечения вещества из сопла современных ракет. При соединении эмитируемых потоков макро-частиц выделяющаяся вследствие рекомбинации зарядов энергия нагреет их массу менее, чем на 1 К. Другими словами, удельные тепловые потери энергии здесь гораздо меньше по сравнению с обычными ракетами, где большая часть энергии расходуется на бесполезный нагрев до  $(2-3) \cdot 10^3$  К отбрасываемого вещества. У ЭРЭ-системы этот канал потерь энергии отсутствует, отброшенная масса остается холодной.

Поток электрически заряженных макро-частиц способен создавать реактивную силу не только в вакууме, но и в воздушной среде, инициируя появление попутного потока воздуха. Это явление известно как ионный или электрический ветер [3, 4].

Заметим, что в работах [5—8] направленный воздушный поток вызывался движением в электрическом поле атомных и молекулярных ионов, рождающихся при электрическом разряде в воздухе. Оценка эффективности преобразования электрической энергии в энергию воздушного потока показала, что в этих условиях она составляет доли процента. Авторы пришли к выводу, что причина этого — высокое отношение  $V_q/V_a$ , характерное для атомных и молекулярных ионов (т. е. *микро-частиц*). Здесь  $V_q$  — скорость микро-частиц относительно воздуха,  $V_a$  — скорость сопутствующего воздушного потока. В ЭРЭ-системах макро-частицы обладают на порядки меньшей величиной  $q/m$ , чем молекулярные ионы (микро-частицы), и, соответственно, имеют несравненно меньшую скорость  $V_q$  после прохождения той же разности потенциалов  $U$ . Поэтому можно ожидать, что их использование для передачи энергии воздушному потоку может оказаться гораздо более эффективным, чем в работах [5—8].

Если энергетическая цена получения движущей силы в воздушной среде с использованием макро-частиц окажется ниже такой цены у современных воздушных судов, то это будет означать, что возможно создание летательных аппаратов, которые можно будет использовать и в вакууме, и в плотной воздушной среде, причем в обоих случаях с меньшими затратами энергии, чем у современных аппаратов. Поэтому представляется важным выяснить, насколько эффективно может быть преобразование энергии потока, переносимого макро-частицами, в энергию воздушного потока.

Для работы ЭРЭ-системы в качестве реактивного двигателя необходимы источник постоянного тока и вещество для создания макро-частиц. Все это может дать батарея топливных элементов, где электрохимический КПД больше 70 %, а продуктом электрохимической реакции является вода, в принципе, пригодная для создания макро-частиц в виде капелек.

Анализ эффективности преобразования электрической энергии в энергию воздушного потока с использованием воды, вырабатываемой топливными элементами, проделан в краткой работе [9]. Этот анализ воспроизведен в данной статье и дополнен анализом достоинств и недостатков летательных аппаратов, снабженных ЭРЭ-системами в качестве реактивных двигателей.

В ЭРЭ-системе электрически заряженные макро-частицы создаются внутри электродов А и В. И внутри этих электродов, и вне их эти частицы движутся в электрическом поле, передавая энергию воздушному потоку. В данной работе ограничимся исследованием эффективности передачи энергии воздушному потоку внутри электродов. Здесь электрическое поле, создаваемое источником питания, можно сделать неизменным вдоль всей траектории макро-частицы. Это упрощает математический анализ.

### Внутреннее устройство электродов ЭРЭ-систем

Внутреннее устройство электродов А и В (см. рис. 1), которое было бы пригодно для создания реактивной силы и в вакууме, и в плотном газе, подробно показано на рис. 2 совместно с элементами, необходимыми для работы электродов. Здесь W — это резервуар с водой, поступающей по трубке М из топливных элементов Т. Из W вода по трубке К поступает в эмитирующий элемент С. Элемент С — это решетка из ряда сообщающихся параллельных трубок из электропроводящего материала. На каждой из трубок находится ряд полых острий Е, по внутреннему капилляру которых жидкость выходит на кончики этих острий. Таким

образом, элемент С совместно с находящейся над ним металлической сеткой 1 является многоострийным эмиттером электрически заряженных водяных капелек. Меняя напряженность электрического поля между элементом С и сеткой 1, можно менять массу и электрический заряд капелек. Полярность заряда совпадает с полярностью полюса источника питания, соединенного решеткой С.

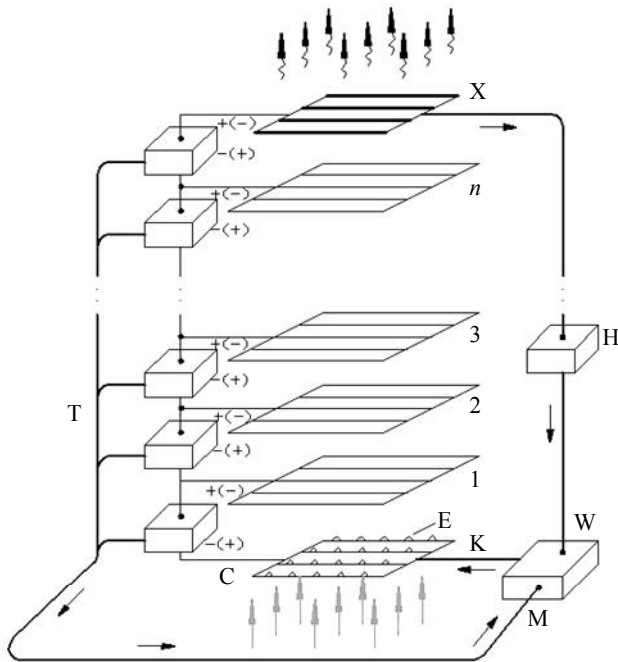


Рис. 2. Внутреннее устройство электродов ЭРЭ-систем

Генерация потока электрически заряженных капелек из кончика металлического капилляра, находящегося в сильном электрическом поле, — явление достаточно хорошо изученное в работах [10, 11].

Оторванные электрическим полем от кончиков капилляров электрически заряженные капли движутся по электрическому полю к сетке 1. За сеткой 1 они попадают в область, где электрическое поле формируется рядом параллельных сеток 2, 3 ... n, ускоряющих частицы.

В вакууме эффект реактивной отдачи происходит из-за отбрасывания от аппарата массы самих частиц. В отличие от этого, в плотной атмосфере реактивный эффект достигается отбрасыванием, главным образом, увлекаемой воздушной массы. Здесь капли являются промежуточным звеном, передающим усилие от электродов воздуху. Поступающий снаружи воздух (прямые стрелки вниз, рис. 2), пройдя решетку С, насыщается электрически заряженными частицами. Воздух увлекается капельками и с некоторой скоростью выбрасывается в пространство (волнистые стрелки вверх, рис. 2), создавая реактивный эффект.

Рассмотрение процесса передачи энергии воздушному потоку заряженными капельками будем

вести для случая, когда плотность воздуха  $\rho$  многократно превосходит  $M_w$  — суммарную массу водяных капелек в единице объема, т. е.

$$\rho \gg M_w. \quad (1)$$

Будем также пренебрегать трением воздуха на элементах конструкции электродов.

Величину реактивной силы и эффективность использования энергии постоянного тока для ее получения в плотном воздухе можно оценить, рассмотрев взаимодействие потока заряженных частиц с потоком воздуха внутри электродов (см. рис. 2).

### Эффективность использования водной массы

На рис. 2 показан элемент X, извлекающий воду из выходящего наружу воздушного потока. Эту воду насос Н возвращает в резервуар W для повторного использования. В случае отсутствия элемента X масса воды, ежесекундно пересекающей поперечное сечение электрода, равна массе воды  $d$ , вырабатываемой в единицу времени топливными элементами.

Возможно использование дополнительного источника воды (на рис. 2 он не показан). Пусть его интенсивность  $d_w = Z_1 \cdot d$ . Нетрудно показать, что если отношение массы воды, уловленной элементом X и возвращенной в резервуар W, к массе воды, уносимой воздушным потоком наружу, равно Z, то задействование этой возвращенной в резервуар W воды позволяет получить поток водных капелек с плотностью  $d_0$ , большей  $d$ , т. е.

$$d_0 = Z \cdot (Z_1 + 1) \cdot d.$$

### Постановка задачи. Модель воздушного потока

Пусть электрод ЭРЭ-системы находится в воздухе, плотность которого  $\rho$ . Давление потока заряженных частиц на воздух внутри электрода вызовет появление входящего в электрод со стороны решетки С и выходящего со стороны элемента X потоков воздуха с плотностями  $\rho_1$  и  $\rho_2$  и скоростями  $V_1$  и  $V_2$ , соответственно.

Рассмотрение будем вести для случая  $V_1, V_2 \ll s$ , где  $s$  — скорость звука в газе. Это позволяет считать газ несжимаемым, а следовательно, можно полагать, что

$$\rho_1 \cong \rho_2 \cong \rho. \quad (2)$$

Поперечные сечения входа и выхода из электрода считаем одинаковыми. Из условия непрерывности  $\rho_1 \cdot V_1 = \rho_2 \cdot V_2$  и (2) следует, что  $V_1 \cong V_2$ .

Из последних соотношений следует, что оправдана расчетная модель, в которой энергия потока

электрически заряженных капелек передается потоку воздуха с неизменной плотностью и скоростью. В рамках такой модели ставим задачу по определению скорости газового потока  $V_a$ , которая установится в результате увлечения воздушной массы потоком электрически заряженных капелек с зарядом  $q$ , переносящих ток с плотностью  $j$  и движущихся в продольном электрическом поле  $E$ , существующем на длине  $L \gg L_1$ . Здесь  $L_1$  — это та длина, на которой капельки, эмитированные относительно электрода с нулевой скоростью и двигаясь затем в поле  $E$ , получают относительно газовой среды столь большую скорость  $V_q$ , при которой приложенная к каждой из капелек электрическая сила  $F_q = q \cdot E$  будет в большей степени тратиться не на ускорение капельки, а на преодоление динамического сопротивления среды  $F_a$ . Задача по определению  $L_1$  решена в Приложении.

После определения  $V_a$  найдем величину реактивной силы  $F$ , действующую на единицу поперечной площади электродной системы, и коэффициент преобразования электрической энергии в энергию воздушного потока.

### Равновесная скорость заряженных капелек

Сила динамического давления воздуха на капельку, движущуюся относительно среды со скоростью  $V_q$ , можно записать в следующем виде:

$$F_a = \frac{c \cdot \rho \cdot S}{2} \cdot V_q^2. \quad (3)$$

Здесь  $S$  — площадь поперечного сечения капли,  $c = 0,2—0,4$  — коэффициент, учитывающий форму капли.

Пусть капельки являются сферами радиуса  $R$ . Приравняв  $F_q$  и  $F_a$ , получим максимально возможную скорость движения капель относительно среды  $V_q = V_{qm}$

$$V_{qm} = \frac{0,8}{R} \cdot \sqrt{\frac{q \cdot E}{c \cdot \rho}}. \quad (4)$$

Если капельки имеют столь малый радиус  $R$  и движутся относительно среды со столь малой скоростью  $V_q$ , что число Рейнольдса  $Re \ll 1$ , то справедлива формула Стокса в виде:

$$V_{qm} = \frac{q \cdot E}{6 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot R};$$

$$Re = \frac{V_q \cdot R \cdot \rho}{\gamma}.$$

Для воздуха при атмосферном давлении  $\gamma = 1,72 \cdot 10^{-5}$ .

### Зависимость отношения $V_a/V_{qm}$ от параметров системы и капель

Принятое здесь условие  $L \gg L_1$  позволяет считать скорость движения капель относительно среды  $V_q$  неизменной вдоль всего пути  $L$  и равной  $V_{qm}$ . В этом случае плотность объемного заряда определяется так:

$$Q = \frac{j}{V_a + V_{qm}}. \quad (5)$$

Величину электрической силы  $F_Q$ , приложенной со стороны электрода к единице поперечного сечения потока капелек на всей длине электрода  $L$ , можно найти так:

$$F_Q = \frac{j \cdot L \cdot E}{V_a + V_{qm}}. \quad (6)$$

Если эта сила  $F_Q$  полностью уравновешена динамическим давлением воздуха, а именно это и имеет место в рассматриваемом случае, когда  $V_q = V_{qm}$ , то справедлива следующая картина. Элементы электрода (см. рис. 2) посредством создаваемого ими электрического поля давят на электрически заряженные капли с силой  $F_Q$ , а они с той же силой  $F_Q$  давят на воздушную массу, т. е. можно сказать, что элементы электрода и воздушная масса через промежуточного посредника, которым являются капли, отталкиваются друг от друга с силой  $F_Q$ . Сила взаимного отталкивания воздушной массы и аппарата связана со скоростью отбрасываемого воздуха  $V_a$  соотношением:

$$F = \frac{\rho \cdot V_a^2}{2}. \quad (7)$$

Приравняв  $F_Q$  и  $F$ , получим

$$V_a^3 + V_a^2 \cdot V_{qm} - \frac{2 \cdot j \cdot L \cdot E}{\rho} = 0. \quad (8)$$

Введем обозначение  $V = V_a/V_{qm}$ . Тогда вместо (8) имеем

$$V^3 + V^2 - \frac{2 \cdot j \cdot L \cdot E}{\rho \cdot V_{qm}^3} = 0. \quad (9)$$

Далее будем использовать выражение

$$f = 27 \cdot \frac{j \cdot L \cdot E}{\rho \cdot V_{qm}^3}. \quad (10)$$

Использование коэффициента 27 в (10) позволяет придать решению уравнению (9) более ком-

пактную форму. Решением (9) при  $f < 2$  является следующее значение для  $V$ :

$$V = \frac{1}{3} \cdot \left[ 2 \cdot \cos \left( 60^\circ - \frac{\arccos(1-f)}{3} \right) - 1 \right]. \quad (11)$$

При  $f < 2$  решение можно записать в следующем виде:

$$V = \frac{1}{3} \cdot (\xi + \xi^{-1} - 1), \quad (12)$$

где  $\xi = \sqrt[3]{(f-1) + \sqrt{(f-1)^2 - 1}}$ .

Для сферических капель, воспользовавшись соотношением (4), можно написать вместо (10)

$$f = 53 \cdot j \cdot L \cdot R^3 \cdot \sqrt{\frac{c^3 \cdot \rho}{q^3 \cdot E}}. \quad (13)$$

Если  $Re \ll 1$ , то получим

$$f = \frac{1,8 \cdot 10^5 \cdot j \cdot L \cdot \gamma^3 \cdot R^3}{\rho \cdot q^3 \cdot E^2}.$$

График зависимости  $V$  от  $f$  представлен на рис. 3.

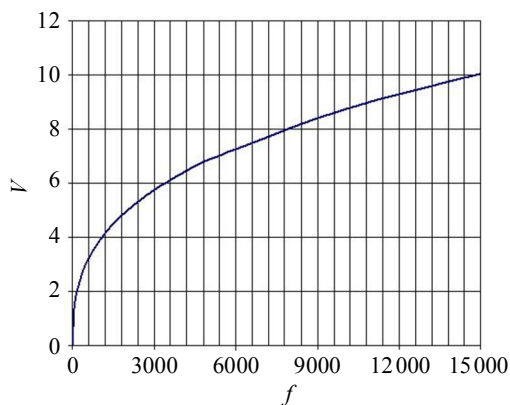


Рис. 3. Изменение нормированной скорости воздуха  $V = V_a/V_{qm}$  от параметра  $f$ . Все величины на графике безразмерные

### Определение скорости установившегося воздушного потока, величины реактивной силы и коэффициента преобразования электрической энергии в энергию воздушного потока

Выражения (11) и (12) с использованием (13) устанавливают зависимость установившейся скорости воздушного потока  $V_a$ , выраженной в единицах скорости  $V_{qm}$  от параметров системы  $j$ ,  $L$ ,  $E$ ,  $\rho$  и параметров капель  $q$  и  $R$ . Зная эту зависимость, легко определить  $V_a$ , а также приходящиеся на единицу площади поперечного сечения силу реактивной отдачи  $F$  и  $P_a$  — мощность установившегося воздушного потока.

Очевидно, что

$$V_a = V_{qm} \cdot V. \quad (14)$$

Из (7) следует:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{qm}^2 \cdot V^2. \quad (15)$$

Поскольку через единицу площади поперечного сечения ежесекундно переносится воздушная масса, равная  $\rho \cdot V_{qm} \cdot V$ , то очевидно, что

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{qm}^3 \cdot V^3. \quad (16)$$

С учетом (15) можно написать вместо (16)

$$P_a = F \cdot V_{qm} \cdot V. \quad (17)$$

Для поддержания плотности мощности воздушного потока затрачивается мощность  $P_s = j \cdot L \cdot E$ . Если учесть (6) и то, что  $F_Q = F$ , то окончательно:

$$P_s = F \cdot V_{qm} (V + 1). \quad (18)$$

Взяв отношение  $P_a$  к  $P_s$ , получим величину коэффициента полезного действия системы  $\eta$  в следующем виде:

$$\eta = \frac{V}{V + 1}. \quad (19)$$

Выражение (19), используемое совместно с (11) или (12) и с привлечением (13), дает возможность определить коэффициент полезного действия при любых заданных параметрах системы и параметрах капель. Таким образом, задачу по определению эффективности преобразования энергии постоянного тока в энергию воздушного потока с использованием потока электрически заряженных капелек, движущихся в постоянном электрическом поле, неизменном вдоль всего потока, можно считать решенной в условиях, когда  $V_a \ll s$ ,  $L \gg L_1$  и  $\rho \gg M_w$ .

В практическом плане важно знать, как  $\eta$  зависит от  $f$ -числа, включающего все показатели, характеризующие работу системы и параметры капель. Эту зависимость легко получить из (19), воспользовавшись (11) и (12). Соответствующий график  $\eta(f)$  представлен на рис. 4.

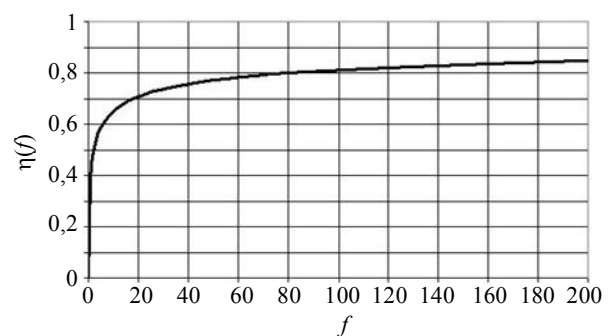


Рис. 4. Зависимость коэффициента полезного действия  $\eta$  от  $f$ . Все величины безразмерные

Если  $f$  достаточно велико, а именно, удовлетворено условие  $(f - 1)^2 \gg 1$ , то нетрудно вывести, что зависимость  $\eta$  от  $f$  может быть выражена простой аналитической формулой

$$\eta = 1 - \frac{3\sqrt[3]{2(f-1)}}{(\sqrt[3]{2(f-1)} + 1)^2}. \quad (20)$$

**Влияние размера капель на эффективность передачи энергии воздушному потоку при неизменном расходе воды**

Величина заряда капельки  $q$  определяется напряженностью  $E_0$ , которая имеет место между эмитирующей решеткой  $C$  и сеткой 1 (см. рис. 2)

$$q = 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R^2 \cdot k \cdot E_0. \quad (21)$$

Здесь коэффициент  $k$  учитывает усиление поля вблизи эмитирующего капельки отверстия.

Если через  $1 \text{ м}^2$  в  $1 \text{ с}$  проходит масса воды  $d_0$  в виде сферических капелек плотностью  $\rho_k$  и объемом  $\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3$ , то значение плотности тока  $j$  можно выразить:

$$j = \frac{3 \cdot k \cdot \epsilon_0 \cdot d_0 \cdot E_0}{R \cdot \rho_k}. \quad (22)$$

Подставив в (13) значения  $q$  и  $j$  из (21) и (22), будем иметь

$$f = 3,56 \cdot \frac{d_0 \cdot L \cdot c}{\rho_k \cdot R} \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{\epsilon_0 \cdot k \cdot E_0 \cdot E}}. \quad (23)$$

Для  $Re \ll 1$

$$f = 270 \cdot \frac{d_0 \cdot L \cdot \gamma^3}{(\epsilon_0 \cdot k \cdot E_0 \cdot E)^2 \cdot \rho_k \cdot \rho \cdot R^4}.$$

Как видно из приведенных соотношений, при неизменных значениях системы  $L$ ,  $E$ ,  $E_0$  и  $d_0$  значения  $j$  и  $f$  тем больше, чем меньше  $R$ , и, соответственно, растет  $\eta$ , т. е. дробление водной массы на капельки меньшего размера увеличивает эффективность преобразования электрической энергии в энергию воздушного потока.

**Численный пример**

Для получения наглядного представления о соотношении различных величин, характеризующих работу системы, рассмотрим конкретную систему, где мощность батареи топливных элементов, приходящихся на  $1 \text{ м}^2$  поперечной площади потока, и

другие электрические параметры принимаются следующими:

$$P = 10 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2; \quad \eta = 0,7; \quad j = 0,02 \text{ А/м}^2; \\ E \cdot L = 5 \cdot 10^5 \text{ В}.$$

Пусть  $k \cdot E_0 = 2 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ ,  $Z_1 = 2$ ,  $Z = 10$ , а также  $L = 0,5 \text{ м}$ ,  $E = 10^6 \text{ В/м}$ ,  $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_k = 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Примем  $R_0 = 7 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ . Из (21), считая  $R = R_0$ , получим  $q = 10^{-18} \text{ Кл}$ . Капля меняет свою скорость относительно электродной системы от 0 до  $V_a + V_{qm}$ . В определенный момент ее скорость становится равной  $V_a$ , т. е.  $V_q = 0$ . Очевидно, что здесь  $Re \ll 1$ . Если при последующем увеличении  $V_q$  равенство  $F_a = q \cdot E$  будет достигнуто при столь малом  $V_{qm}$ , что условие  $Re \ll 1$  сохранится, то для определения  $V_{qm}$  следует пользоваться (4), получая  $V_{qm} = 0,044 \text{ м/с}$ . Этой скорости относительно среды соответствует  $Re = 1,8 \cdot 10^{-4}$ , т. е. условие  $Re \ll 1$  остается в силе.

Из (10) получим  $f = 3,14 \cdot 10^9$ , а из (12) найдем  $V = 620$ . Затем из (14) определяем  $V_a = 27,13 \text{ м/с}$ . Тогда соотношение (15) дает  $F = 368 \text{ Н/м}^2$ , и окончательно из (19) получим  $\eta = 0,998$ , что убеждает в высокой энергетической эффективности рассматриваемой схемы.

**Сравнение энергетической эффективности рассматриваемого метода с методом, используемым в современных летательных аппаратах**

Для выявления практической значимости предлагаемого здесь метода имеет смысл сравнить затраты химической энергии, запасенной в топливе, при получении воздушного потока одинаковой интенсивности у современных вертолетов и при реализации обсуждаемого здесь метода.

Коэффициент полезного действия современных двигателей внутреннего сгорания  $\eta \approx 0,3$ . Коэффициент преобразования механической энергии, затрачиваемой на вращение лопастей в энергию воздушного потока,  $\eta_m \approx 0,55$  [12]. Здесь имеют место потери энергии, связанные с трением лопастей о воздух, закручиванием струи, образованием воздушных вихрей на задней кромке лопастей, неравномерным полем скоростей. Общий коэффициент преобразования энергии химических связей топлива в энергию воздушного потока, например, у вертолета

$$\eta_s = \eta_d \cdot \eta_m = 0,3 \cdot 0,55 = 0,165.$$

У топливных элементов коэффициент преобразования химической энергии в электрическую энергию  $\eta_b > 0,7$ . Как видно из приведенного выше численного примера,  $\eta(f) = 0,998$ .

Таким образом, здесь

$$\eta_s = \eta_b \eta(f) = 0,7 \cdot 0,998 = 0,699.$$

Отсюда видно, что для создания потоков воздуха одинаковой мощности использование описанного здесь метода требует в 4,23 раза меньших затрат химической энергии, запасенной в топливе, нежели имеет место у современных аппаратов.

### Схема ЭРЭ-лета и особенность его движения

Использование для летательного аппарата энергетической установки в виде батареи топливных элементов требует придать этой батарее такую форму, при которой на единицу вырабатываемой электрической мощности приходилась бы минимально возможная масса. Одновременно с этим требуется, чтобы разноименные полюса высоковольтной батареи были расположены как можно дальше друг от друга во избежание электрического пробоя между ними.

Эти два требования будут удовлетворены, если батарее придать форму очень тонкого плоского кольца. Здесь один полюс находится на внешней границе кольца, а другой — на внутренней границе. Чем тоньше (при заданной массе и объеме батареи) кольцо, тем больше расстояние между полюсами и тем больше поверхность батареи. Большая поверхность батареи позволяет эффективно сбрасывать тепло, вырабатываемое при генерации электрической энергии без применения утяжеляющих батарею охлаждающих систем. Если придать батарее или аппарату в целом вращение, то это позволит подавать топливо и отводить воду за счет центробежной силы без использования каких-либо насосов, что также будет способствовать уменьшению веса энергетической системы. Электрическая установка в виде плоского кольца большого размера естественным образом диктует конфигурацию всего аппарата.

На рис. 5 представлена схема всего аппарата. В центре расположен модуль — 1, где находятся система управления, запасы топлива, полезный груз. Центральный модуль окружает батарея 2, выполненная в виде тонкого плоского кольца. Снаружи этого кольца расположены электроды 3, эмитирующие положительно заряженные частицы. Внутри кольца находятся электроды 4, эмитирующие отрицательно заряженные частицы. Эти электроды могут находиться под низким потенциалом и не создавать значительную реактивную силу, но должны обеспечивать ток, уходящий в пространство, равный току положительно заряженных частиц. Ток электродов 4 может быть обеспечен за счет автоэлектронной эмиссии с ост-

рий или за счет коронного разряда на них. Посадочным устройством служат пружинящие стержни 5.

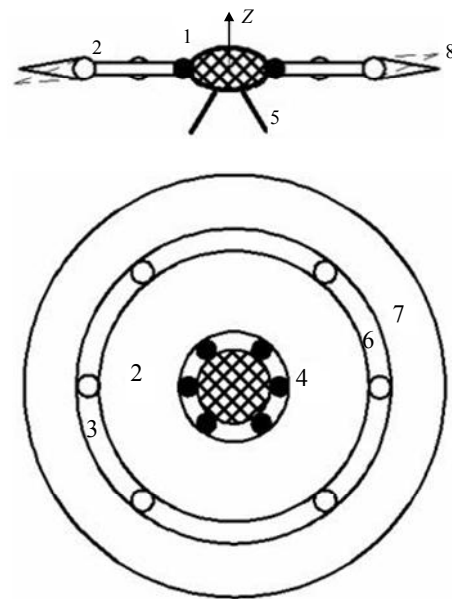


Рис. 5. Схема гипотетического летательного аппарата (вид сбоку и сверху):

- 1 — центральный модуль; 2 — батарея топливных элементов;
- 3 — электроды, эмитирующие положительно заряженные частицы; 4 — электроды, эмитирующие отрицательно заряженные частицы; 5 — посадочное устройство;
- 6 — двигательное кольцо; 7 — управляющее кольцо;
- 8 — кромки управляющего кольца

Наибольшей реактивной силой аппарат будет обладать при наиболее плотном заполнении электродами 3 наружной границы топливной батареи с образованием сплошного двигательного кольца 6.

Особенностью описываемого аппарата является то, что максимальная реактивная сила, которая может быть создана двигательным кольцом, оказывается приложенной в том направлении, при движении в котором аппарат испытывает наибольшее аэродинамическое сопротивление, а именно, вдоль оси  $Z$ .

Ниже будем рассматривать только те случаи, когда ось  $Z$  направлена перпендикулярно к поверхности Земли. Наиболее простой способ создания движущей силы, действующей на аппарат не только в вертикальном, но и в горизонтальном направлении, заключается в размещении на наружной границе аппарата управляющего кольца 7. Создание силы в нужном горизонтальном направлении достигается отклонением кромок 8 управляющего кольца. Отклонение кромок так, как показано на рис. 5 пунктиром, приводит к силе, движущей аппарат слева направо (если реактивная сила направлена вдоль оси  $Z$ ), и справа налево, если сила, приложенная к аппарату вдоль оси  $Z$ , действует в противоположном направлении.

При таком устройстве аппарата перемещение в горизонтальном направлении должно сопровождаться одновременным движением в вертикальном направлении. При непрерывном движении в горизонтальном направлении в заданном по высоте коридоре необходимо периодическое изменение направления вертикальной силы, синхронизированное с изменением наклона кромок. В фазе подъема аппарата двигатель должен работать обязательно, а в фазе снижения — действие двигателя в противоположном направлении необязательно. Силу, направленную к земле, может обеспечить сила тяжести.

При наблюдении извне траектория аппарата будет напоминать траекторию плоского камешка, брошенного вдоль поверхности воды, который не только движется в горизонтальном направлении, но и одновременно совершает колебания в вертикальной плоскости.

Если кольцо топливной батареи или аппарат в целом вращаются вокруг оси  $Z$ , то из-за прецессии вектор реактивной силы будет двигаться по поверхности вертикального конуса. В результате, в своем полете аппарат будет совершать колебательные движения не только в вертикальной, но и в горизонтальной плоскости.

Возможны и другие схемы ЭРЭ-летов [2], которые могут быть близки существующим типам аппаратов и по внешнему виду, и по характеру движения. Описанная же схема приведена здесь потому, что позволяет получить наибольшие реактивную силу и электрическую мощность, приходящиеся на единицу веса летательного аппарата.

### Достоинства ЭРЭ-летов

В первую очередь, к достоинствам ЭРЭ-летов следует отнести их универсальность, т. е. возможность их эксплуатации и в безвоздушном пространстве, и в плотном воздухе. Отметим также, что затраты энергии на создание одной и той же величины движущей силы ожидаются меньшими, чем у современных аппаратов, не только при движении в воздухе, но и в вакууме, поскольку отсутствуют потери тепловой энергии, уносимой высокотемпературными газами обычной ракеты. Можно ожидать, что ЭРЭ-леты превзойдут существующие аппараты и по надежности, и по безопасности, поскольку в их конструкции отсутствуют элементы, подверженные действию высоких температур, давлений и сильных механических нагрузок.

Предполагается, что шум, производимый ЭРЭ-летом, будет много слабее шума, производимого современными летательными аппаратами. По своему характеру он будет близок к тому шипению и потрескиванию, что исходят от высоковольтных проводов. При использовании водорода

в качестве топлива для батареи топливных элементов, очевидно, обеспечивается отсутствие загромождения окружающей среды.

### Недостатки ЭРЭ-летов

Наличие в струе воздуха, исходящей от ЭРЭ-лета, высокой концентрации свободных носителей электрического заряда означает высокую электропроводность переносимого струей воздуха. Можно полагать, что к поверхности ЭРЭ-лета как бы примыкает некое воздушное тело, внутри объема которого электропроводность гораздо выше электропроводности обычного воздуха. Очевидно, что благодаря свету, генерируемому при микроразрядах, происходящих при встрече разноименно заряженных частиц, это образование можно будет наблюдать визуально в темное время суток в виде протяженного светящегося луча. Чем дальше от аппарата, тем меньше число оставшихся непрорекомбинированных частиц, и, соответственно, будет уменьшаться яркость луча.

Большинство негативных эффектов, ожидаемых от ЭРЭ-лета, связано с существованием именно этого тела, внутри которого электропроводность очень велика. Действительно, если оно касается поверхности земли, то ЭРЭ-лет становится аналогом высоко поднятого громоотвода, причем с высокой вероятностью попадания в него молнии. Поэтому использование ЭРЭ-летов вблизи грозовых облаков более опасно в сравнении с использованием существующих аппаратов. Кроме того, движение ЭРЭ-лета на высоте меньшей, чем длина высокопроводящего тела, чревато нарушением работы встречающихся на пути следования ЭРЭ-лета наземных устройств, использующих электрическую энергию. Так, сильное возрастание электрической проводимости между проводами может парализовать работу воздушных линий электропередач, а погружение электрических цепей автомобилей в электропроводящую среду может привести к остановке их двигателей, прекращению работы фар и радиоприемников.

Внутри воздушной струи, причем в одном с нею направлении, движутся два потока электрически заряженных частиц противоположной полярности. Поток положительно заряженных частиц выходит из положительного полюса ЭРЭ-системы, второй поток выходит из отрицательного полюса. С технической точки зрения здесь имеется замкнутая электрическая цепь, т. е. внутри воздушного потока имеет место токовая петля. Эта петля порождает магнитное поле, которое может нарушить работу приборов, чувствительных к внешнему магнитному полю и оказавшихся вблизи ЭРЭ-лета.

Попадание в область с высокой концентрацией электрически заряженных частиц опасно и для



биологических объектов. Электрически заряженные капельки, попадая на неприкрытую поверхность кожи и разряжаясь на ее поверхности, могут вызвать множественные микроожоги.

Заметим, что отмеченных выше нежелательных эффектов можно избежать, если прокладывать трассы ЭРЭ-летов достаточно далеко от земной поверхности.

Отметим здесь также и проблемы, связанные с радиолокационным наблюдением за ЭРЭ-летами. Действительно, если масса выброшенного ЭРЭ-летом воздуха с высокой электропроводностью окажется между ЭРЭ-летом и радиолокатором, то будет иметь место сильное поглощение излучения радиолокатора. В результате, радиолокатор не сможет зафиксировать ЭРЭ-лет.

Трудности могут иметь место и при визуальном наблюдении. Действительно, выбрасываемая ЭРЭ-летом масса капелек может закрыть от наблюдения аппарат искусственным облаком. Этот эффект будет усилен за счет влаги воздуха, которая, конденсируясь на электрически заряженных капельках, сделает завесу еще более плотной.

### Заключение

Исследование, проведенное в данной работе, показывает, что поток электрически заряженных капелек в постоянном электрическом поле может преобразовывать энергию постоянного электрического поля в энергию воздушного потока более эффективно, чем применяемые в настоящее время винты.

Использование этого механизма совместно с таким источником электрического тока, как батарея топливных элементов, делает принципиально возможным создание летательных аппаратов нового типа в виде так называемых ЭРЭ-летов, способных перемещаться не только в вакууме, но и в плотной газовой среде. Предполагается, что это может быть осуществлено с гораздо меньшими затратами энергии, чем у современных устройств.

Создание ЭРЭ-летов станет возможным, если будет достигнут успех в разработке трех важных компонентов этого аппарата, опыт в создании которых отсутствует.

*Первым* компонентом является электродная система с продольным электрическим полем, способная канализировать поток электрически заряженных капелек и не оказывать существенного сопротивления воздушному потоку, идущему внутри нее. Эта же электродная система должна обеспечить минимальное попадание капелек на задающее электрическое поле сетки. Кроме того, эта же электродная система должна в районе выхода из нее воздушного потока обеспечить перехват большей

части водной массы для ее повторного использования.

*Вторым* элементом, который нужно разработать, является эмиттер электрически заряженных капелек с размерами в доли микрона. Эмиттер должен оказывать минимальное сопротивление идущему через него воздушному потоку и обеспечить плотность тока  $j > 0,01 \text{ А/м}^2$ .

*Третьей*, очень серьезной задачей является задача создания батарей топливных элементов, работающих при напряжении в десятки и сотни кВ, но при сравнительно малых токах, измеряемых долями и единицами А.

Проблема обеспечения ЭРЭ-лета электрической энергией может быть решена не только с использованием батареи топливных элементов. Возможна схема электропитания, когда энергия поступает извне в виде лазерного или микроволнового излучений с последующим преобразованием этой энергии в энергию электрического тока. Но в этом случае сфера применимости ЭРЭ-летов будет менее широкой.

*Авторы выражают глубокую признательность А. А. Рухадзе за постоянную поддержку, а также благодарят Г. М. Батанова, В. А. Иванова и К. Ф. Сергейчева, ознакомившихся с рукописью и сделавших ряд полезных замечаний.*

*Приложение*

### Расстояние между задающими продольное электрическое поле сетками

Пусть каждая из сеток является квадратом со стороной  $\lambda$ . Будем считать также выполненным условие  $l \ll \lambda$ , где  $l$  — расстояние между сетками.

При входе в пространство между сетками поле пространственного заряда  $E_q$  направлено против  $E$  и против направления движения капельки. На выходе из этого пространства это поле направлено в сторону движения капли. Поскольку капля проходит множество таких межсеточных отсеков, то помимо постоянного поля  $E$  на нее будет действовать также периодически меняющее свое направление поле  $E_q$ . Ответ на вопрос, как сильно скажется это переменное поле на процесс обмена энергией между потоком капелек и воздушным потоком, требует специального исследования. Здесь же ограничимся определением того, как велико должно быть расстояние между сетками, чтобы соблюдалось условие  $|E_q| < |E|$ . Если это условие будет выполнено, то капли относительно воздушного потока всюду будут двигаться в том же направлении, что и воздушный поток, и непрерывно передавать ему энергию.

На входе в межсеточное пространство суммарное поле меньше, чем  $E$ , на величину  $E_q$ , а на выходе больше, чем  $E$ , на ту же величину  $E_q$ . Это позволяет приписать усредненному по межсеточному пространству полю, определяющему усредненную скорость  $V_q$ , значение  $E$ , а плотности пространственного заряда  $Q_l$ , находящегося между сетками, приписать значение  $Q_l = \frac{j \cdot l}{V_q + V_a}$ . Этот заряд создает напряженность

$E_q = \frac{j \cdot l}{2 \cdot \epsilon_0 (V_q + V_a)}$ . Условие  $|E| < |E_q|$  будет выполнено, если справедливо неравенство

$$l < \frac{2 \cdot \epsilon_0 (V_q + V_a) \cdot E}{j}. \quad (\text{П1})$$

**Определение длины начального участка траектории капли**

Начальным участком будем считать такой, на длине которого энергия, получаемая каплей от электрического источника питания, большей частью тратится на изменение кинетической энергии капли, а не на передачу энергии потоку воздуха. С уменьшением величины  $Re$  возрастает вклад, вносимый силой трения в торможение капли, что приводит к уменьшению длины  $L_1$ . Поэтому, если для случая некоего  $Re_1 \gg 1$  выполнено условие  $L_1 \ll L$ , то при одинаковой величине  $E$  это условие тем более будет выполнено для случая  $Re_2 < Re_1$ .

Определим длину  $L_1$ , полагая, что сила сопротивления среды  $F_a$  определяется (3).

Взаимодействие капли с воздушным потоком состоит из двух этапов. На первом этапе, начинающемся сразу после эмиссии капли,  $F_a$  и  $F_q = q \cdot E$  направлены в одну и ту же сторону, а именно, в сторону движения потока. На втором этапе, наступающем после того, как скорость капли и потока относительно электрода сравняются,  $F_q$  сохраняет свое направление, а  $F_a$  меняет направление и становится направленной против направления движения потока и, соответственно, против действия электростатической силы. С этого момента часть энергии, получаемой каплей со стороны электрического поля, передается потоку, увеличивая его мощность.

Введем обозначения  $b = \frac{q}{m} \cdot E$ ,  $a = \frac{S \cdot c \cdot \rho}{2 \cdot m}$ .

Приравняв  $F_a$  и  $F_q$ , получим максимально возможную скорость  $V_q = V_{qm}$ ,

$$V_{qm} = \sqrt{\frac{b}{a}}. \quad (\text{П2})$$

В качестве координатной системы выберем одномерную систему координат, движущуюся относительно электрода с той же скоростью  $V_a$ , что и поток. Другими словами, в этой системе координат скорость потока равна 0.

За положительное направление координатной оси на первом этапе выберем направление, противоположное направлению потока. Закон изменения скорости капли  $V_q$  относительно потока найдем из решения уравнения

$$\frac{dV_q}{dt} = -a \cdot V_q^2 - b. \quad (\text{П3})$$

В начальный момент  $t = 0$ , т. е. при отрыве капли от капилляра  $V_q = V_a$ . Решение (П3) имеет вид:

$$V_q = \frac{V_a - \sqrt{\frac{b}{a}} \cdot \text{tg}(\sqrt{a \cdot b} \cdot t)}{1 + V_a \cdot \sqrt{\frac{a}{b}} \cdot \text{tg}(\sqrt{a \cdot b} \cdot t)}. \quad (\text{П4})$$

Приравняв в (П4)  $V_q$  к нулю, найдем время  $t_1$ , за которое под действием  $F_a$  и  $F_q$  скорость  $V_a$  капли относительно потока снизится до нуля:

$$t_1 = \frac{\arctg(V_a \cdot \sqrt{\frac{a}{b}})}{\sqrt{a \cdot b}}. \quad (\text{П5})$$

Проинтегрировав (П4) от 0 до  $t_1$ , получим отрезок начального участка траектории капли  $l_1$ , в котором скорость  $V_q$  изменилась от  $V_a$  до 0:

$$l_1 = \frac{1}{a} \cdot \ln \left| \cos \left( \arctg \left( \frac{V_a}{V_{qm}} \right) \right) + \frac{V_a}{V_{qm}} \cdot \sin \left( \arctg \left( \frac{V_a}{V_{qm}} \right) \right) \right|. \quad (\text{П6})$$

Для определения зависимости  $V_q$  от времени на втором этапе примем за положительное направление координатной оси направление, совпадающее с направлением потока. Закон изменения  $V_q$  от времени на втором этапе найдем, решая уравнение:

$$\frac{dV_q}{dt} = b - a \cdot V_q^2. \quad (\text{П7})$$

Решив (П7), получим

$$V_q = V_{qm} \cdot \left( \frac{e^{2 \cdot \sqrt{a \cdot b} \cdot t} - 1}{e^{2 \cdot \sqrt{a \cdot b} \cdot t} + 1} \right). \quad (\text{П8})$$

Из (П8) видно, что во времени величина  $V_q$  будет стремиться к  $V_{qm}$  как к пределу. Условимся считать, что начальный участок траектории капли завершен, когда  $V_q = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{qm}$ .

Используя (П8), легко найти интервал времени  $t_2$  и отрезок  $l_2$ , на длине которого это произойдет:

$$t_2 = \frac{0,88}{\sqrt{a \cdot b}}; \quad (\text{П9})$$

$$l_2 = \frac{\ln 8}{2 \cdot a}. \quad (\text{П10})$$

Очевидно, что искомая длина

$$L_1 = l_2 - l_1 + V_a(t_1 + t_2). \quad (\text{П11})$$

**Литература**

1. Лукьянчиков Г. С. // Прикладная физика. 2004. № 2. С. 59.
2. Luk'yanchikov G. S. // Physics Letters. 2005. V. A342. No. 1. P. 11.
3. Robinson M. // AIEE Trans. 1961. No. 80. P. 143.
4. Robinson M. // Am. J. Phys. 1962. V. 30. No. 366. P. 72.
5. Sigmond R. S., Lagstadt J. H. // High Temp. Chem. Proces. 1993. V. 2 No. 221. P. 9.
6. Moreau E., Labergue A., Touchard G. About the kinetic power induced by AC and DC discharges //Proc IEEE-CEIDP (Nashville, USA, October 2005). P. 490-4.
7. Moreau E., Leger L., Touchard G. // J. Electrostat. 2006. V. 64. No. 215. P. 25.
8. Moreau E. // J. Phys. D. Appl. Phys. 2007. V. 40. No. 605. P. 636.
9. Luk'yanchikov G. S., Khaziev T. R. // 2010, Physics Letters A 375.73-79.
10. Hayati L., Bailey A. J., Tardos Th. H. // J. Colloid Interface Sci. 1987. V. 117. No. 205. P. 12.
11. Cloupeau M., Prunet-Foch B. // J. Aerosol Sci. 1994. V. 21. No. 1024. P. 36.
12. Стасенко А. Л. Физика полета. — М.: Наука, 1988.

## Aircraft reactive force to be created by the charged droplets

*G. S. Luk'yanchikov*

Prokhorov General Physics Institute  
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: genluk1@rambler.ru

*T. R. Khaziev*

Moscow Power Institute  
14 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia

*In the article, an aircraft reactive force to be created by the charged droplets has been considered. A scheme of the possible device is shown.*

PACS: 88.85.Hj

*Keywords:* reactive force, electric discharge, electrically charged droplets.

Bibliography — 12 references.

*Received July 20, 2011*