

Соотношение (25) можно записать в виде

$$A_n = \frac{L_1 B_1^2 C_n^* + L_2 B_2^2 D_n^*}{L_1 B_1^2 \tilde{N}_1^2 + L_2 B_2^2 \tilde{N}_2^2}, \quad (26)$$

где

$$C_n^* = \int_0^x \xi (\theta_{01} - \Psi_1(\xi)) J_0(\gamma_n \varepsilon \xi) d\xi; \quad (27)$$

$$D_n^* = \int_x^1 \xi (\theta_{02} - \Psi_2(\xi)) [P(\gamma_n, \varepsilon, \zeta) J_0(\gamma_n \xi) + Z(\gamma_n, \varepsilon, \zeta) N_0(\gamma_n \xi)] d\xi. \quad (28)$$

Интегрируя выражения (23), (24), получим

$$\tilde{N}_1^2 = \frac{\zeta^2}{2} [J_1^2(\gamma_n \varepsilon \zeta) + J_0^2(\gamma_n \varepsilon \zeta)]; \quad (29)$$

$$\tilde{N}_2^2 = \frac{1}{2} [F_1^2(\gamma_n) + F_0^2(\gamma_n) - x^2 (F_1^2(\gamma_n \zeta) + F_0^2(\gamma_n \zeta))], \quad (30)$$

где

$$\begin{aligned} F_0(\gamma_n) &= P(\gamma_n, \varepsilon, \zeta) J_0(\gamma_n) + Z(\gamma_n, \varepsilon, \zeta) N_0(\gamma_n); \\ F_0(\gamma_n \zeta) &= P(\gamma_n, \varepsilon, \zeta) J_0(\gamma_n \zeta) + Z(\gamma_n, \varepsilon, \zeta) N_0(\gamma_n \zeta); \\ F_1(\gamma_n) &= P(\gamma_n, \varepsilon, \zeta) J_1(\gamma_n) + Z(\gamma_n, \varepsilon, \zeta) N_1(\gamma_n); \\ F_1(\gamma_n \zeta) &= P(\gamma_n, \varepsilon, \zeta) J_1(\gamma_n \zeta) + Z(\gamma_n, \varepsilon, \zeta) N_1(\gamma_n \zeta). \end{aligned}$$

Выражения для C_n^* и D_n^* после интегрирования соотношений (27) и (28) с учетом (15) имеют вид

$$\begin{aligned} C_n^* &= \frac{1}{4L_1} \left[J_0(\gamma_n \varepsilon \zeta) \left[\frac{2\zeta^2}{(\gamma_n \varepsilon)^2} \right] + \right. \\ &\left. + J_1(\gamma_n \varepsilon \zeta) \left[\frac{\zeta^3 - \zeta \tilde{l}_3}{\gamma_n \varepsilon} - \frac{4\zeta}{(\gamma_n \varepsilon)^3} \right]; \right. \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} D_n^* &= \frac{\zeta}{4L_2} \left[F_0(\gamma_n) \frac{1}{\gamma_n^2} (2 - l_2) + \right. \\ &+ F_1(\gamma_n) \frac{1}{\gamma_n} (1 - \tilde{l}_1 - \frac{4}{\gamma_n^2}) - F_0(\gamma_n \zeta) \frac{1}{\gamma_n^2} (2\zeta^2 - l_2) - \\ &\left. - F_1(\gamma_n \zeta) \frac{1}{\gamma_n} (\zeta^3 - \tilde{l}_1 \zeta - l_2 \zeta \ln \zeta - \frac{4\zeta}{\gamma_n^2}) \right], \end{aligned} \quad (32)$$

где $\tilde{l}_1 = l_1 - 4L_2 \theta_{02} / \zeta$, $\tilde{l}_3 = l_3 - 4L_1 \theta_{01}$.

Таким образом, соотношения (8), (15), (19)–(21), (26)–(32) описывают температурные поля в двухслойном цилиндрическом объекте при наличии равномерно распределенных по объему и постоянных во времени источников теплоты. Численный анализ полученных выражений при наличии современных вычислительных средств не представляет затруднений и позволяет оценить температурное воздействие при СВЧ-нагреве двухслойных цилиндрических объектов, в частности пантов.

Список литературы

1. Горин Д.А. Задача теоретического исследования процесса технологического нагрева пантов северного оленя в ЭМП СВЧ // Наукові праці Одеського національного академі харчових технологій. — Одеса, 2012. — Вип. 41. — Т. 2. — С. 221–225.
2. Будаев В.Д., Флегонтов А.В. Метод разделения переменных в математической физике: учеб. изд. — СПб.: Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, 2009. — С. 10–18.

УДК 631.3.032

С.А. Андреев, канд. техн. наук
Е.А. Петрова

Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИОНОВ ОЗОНА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ ДВИЖИТЕЛЕМ

Электростатические движители приобретают возрастающую роль в различных областях техники и сельского хозяйства. Например, для вентиляции помещений, активного перемешивания газов, нанесения краски или распыления аэрозолей. Перспективное направление использования электростатических движителей связано с осуществлением озонного наддува в топочные камеры водогрейных котлов.

Известно, что озон, являясь сильным окислителем, способен существенно интенсифицировать процесс горения топлива. В то же время, в отли-

чие от обычного кислорода, озон легко получается из воздуха и поэтому его применение в качестве агента наддува более перспективно [1]. В связи с чрезвычайной нестойкостью озона процесс его получения должен производиться непосредственно перед подачей в топку. Поэтому в конструкции котла необходимо предусмотреть озонатор и вентилятор. При этом последний служит для нагнетания полученного озона в топочную камеру [2]. Однако дополнение небольших водогрейных котлов вентиляторами приводит к их усложнению, удорожанию, снижает надежность и создает предпосыл-

ки для возникновения вибрационных или акустических помех.

Перечисленные обстоятельства определяют целесообразность использования электростатического способа подачи озона без механических вентиляторов [3]. Эта задача решается с помощью «ионного ветра», создаваемого электростатическими движителями. Однако широкому распространению такого способа препятствует его недостаточная изученность, препятствующая разработке простых и эффективных устройств.

В ионном движителе осуществляется разгон электрически заряженных частиц в электростатическом поле. Для создания ионного ветра могут использоваться ионы атомов и молекул, а также заряженные коллоидные частицы, капли или пылинки. При использовании этого эффекта для интенсификации горения рабочим телом являются положительные ионы атомов озона.

Принцип действия электростатического движителя весьма схож с электрореактивным ракетным двигателем [4]. Основное различие заключается лишь в том, что в ракетных двигателях целью является перемещение ракеты, а в электростатическом движителе — перемещение рабочего тела. И если в тепловых ракетных двигателях сила тяги образуется вследствие ударов молекул или атомов о стенку камеры, то в электростатических движителях сила тяги в основном возникает вследствие взаимодействия частиц с электромагнитными полями.

Скорость частиц массой m с зарядом e на выходе из электростатического движителя определяется из уравнения энергии:

$$m(\omega^2 - \omega_a^2)/2 = e(u_a - u), \quad (1)$$

откуда

$$\omega = \sqrt{\frac{2e(u_a - u)}{m} + \omega_a^2}, \quad (2)$$

где $(u_a - u)$ — разность потенциалов между началом и концом разгона; ω_a — начальная скорость ионов на аноде.

При стационарном истечении одноименных заряженных частиц из изолированного движителя электрический потенциал будет непрерывно возрастать, что очень быстро приведет к торможению частиц в поле и прекращению работы движителя. Во избежание этого необходимо нейтрализовать выходящую струю положительно заряженных ионов электронами или отрицательными ионами. При этом суммарный заряд выходящих частиц должен быть равным нулю. На рис. 1 показана принципиальная схема ионного электростатического движителя.

Нейтральное рабочее тело (озон) подается в ионизатор 2, где происходит разделение атомов на ионы и электроны. Пучок ионов 3, выходящий

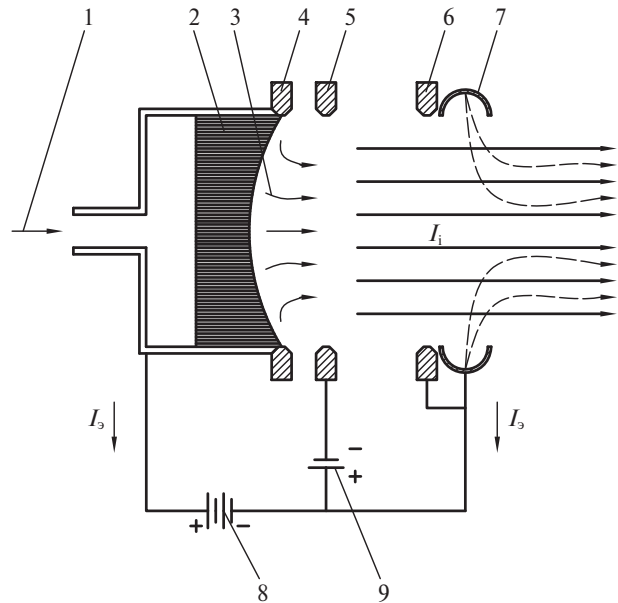


Рис. 1. Принципиальная схема ионного электростатического движителя

из ионизатора, формируется фокусирующим электродом 4, с тем, чтобы свести до минимума попадание ионов на ускоряющий электрод 5. Фокусирующий электрод и ионизатор имеют одинаковый положительный потенциал. Разность потенциалов между ионизатором и ускоряющим электродом выбирается таковой, чтобы скорость ионов на выходе из ускоряющего электрода несколько превышала необходимое значение. Это способствует увеличению плотности тока ионов, которая в электростатических движителях составляет несколько миллиампер на квадратный сантиметр.

За ускоряющим электродом установлен замедляющий электрод 6. Если принять, что потенциал замедляющего электрода равен нулю, то потенциал ускоряющего электрода окажется несколько меньшим нуля. Между ускоряющим и замедляющим электродами скорость ионов уменьшается до заданного значения. В пространстве между электродами и ионизатором необходимо создать такие условия, чтобы средний свободный пробег частиц в остаточном газе значительно превышал расстояние между электродами. Это сводит к минимуму соударение ионов с атомами остаточного озона, ионизацию последних и попадание вновь образовавшихся вторичных ионов и электронов на элементы ускорителя.

Электроны от ионизатора по системе проводов поступают в нейтрализатор 7, а из него — в струю ионов, нейтрализуя ее. Потенциал нейтрализатора мало отличается от потенциала замедляющего электрода. Поэтому на схеме условно показано, что они находятся под одинаковым потенциалом. Разность потенциалов между нейтрализатором и ускоряющим электродом препятствует попада-

нию на ускоряющий электрод и ионизатор электронов, выходящих из нейтрализатора. Необходимая разность потенциалов между ионизатором и нейтрализатором создается источником тока δ , мощность которого расходуется в основном на разгон ионов между ионизатором и ускоряющим электродом. Мощность источника невелика, так как сила тока в его цепи мала, а в идеальном случае, когда ионы не попадают на ускоряющий электрод, вообще равна нулю.

Рассмотрим движение положительно заряженных ионов в однородном электрическом поле, создаваемом двумя бесконечными параллельными пластинами A и K (рис. 2).

Пластина A является анодом с потенциалом u_a , а пластина K — катодом потенциал которого $u_k = 0$. Расстояние между электродами равно L . Если в пространстве между анодом и катодом находится небольшое число ионов, то потенциал от u_a до $u_k = 0$ меняется линейно (кривая 1), а скорость иона от анода к катоду увеличивается от ω_a до ω_k по параболическому закону (кривая 4). Такое изменение потенциала и скорости получается при плотности тока между электродами, близкой к нулю.

При плотности тока, отличной от нуля, присутствие значительного количества ионов озона между электродами создает положительный пространственный заряд, потенциал которого приближенно представлен кривой 2. В этом случае потенциал между электродами будет характеризоваться кривой 3, являющейся суммой приложенного потенциала и потенциала пространственного заряда. При большой величине пространственного заряда кривая 3 может иметь максимум. При таком распределении потенциала скорость ионов от ω_a до ω_k будет изменяться согласно кривой 5. Там, где потенциал имеет максимальное значение, скорость окажется минимальной.

Установим количественные соотношения между основными параметрами, характеризующими движение ионов в межэлектродном пространстве. Предположим, что все ионы имеют одинаковый заряд e и одинаковую массу m . Начало отсчета вдоль оси абсцисс совместим с положением анода. Так же, как и раньше, обозначим начальную скорость ионов на аноде через ω_a , принимая ее для всех ионов одинаковой. Соответственно скорость ионов у катода будет равна ω_k .

Дальнейшее рассмотрение задачи произведем для случая, когда в сечении x_0 между электродами потенциал имеет максимум, превышающий потен-

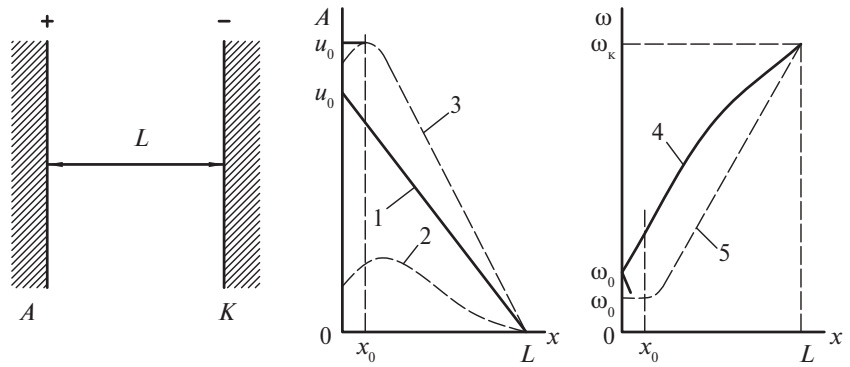


Рис. 2. Распределение скорости и потенциала между электродами

циалы анода и катода. Обозначим минимальную скорость при $x = x_0$ через ω_0 , а максимальный потенциал — через u_0 .

Для дальнейших рассуждений помимо формул (1) и (2) воспользуемся уравнением плотности тока:

$$j = ne\omega \text{ или } j = \rho\omega, \quad (3)$$

где n — количество зарядов в единице объема; ρ — плотность заряда.

Поскольку задача линейная, то плотность тока не зависит от x . Если наименьшей скоростью обладают ионы, находящиеся вблизи анода, то плотность заряда в этой области будет наибольшей. Скопление положительных зарядов у анода уменьшает напряженность электрического поля в этой части межэлектродного промежутка и препятствует движению ионов от анода к катоду. С ростом тока плотность заряда у анода возрастает настолько, что дальнейшее увеличение тока становится невозможным и плотность тока приобретает максимальное значение. Такой максимальный ток обозначим символом j_m .

Связь между потенциалом и плотностью пространственного заряда определяется уравнением Пуассона:

$$\frac{d^2u}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (4)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная,
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н}\cdot\text{м}^2)$.

Подставляя в уравнение (4) выражения (1) и (2), получим

$$\frac{d^2u}{dx^2} = -\frac{j}{\epsilon_0\omega} = -\frac{j}{\epsilon_0\sqrt{2e(u_a - u) / m + \omega_a^2}}.$$

$$\text{Так как } \frac{d^2u}{dx^2} = \frac{1}{2} \frac{d}{du} \left(\frac{du}{dx} \right)^2, \text{ а } \left(\frac{du}{dx} \right)^2 = 2 \int \frac{d^2u}{dx^2} du,$$

$$\text{то } \left(\frac{du}{dx} \right)^2 = -\frac{2j}{\epsilon_0} \int \frac{du}{\sqrt{2e(u_a - u) / m + \omega_a^2}} = \frac{2jm}{\epsilon_0 e} \omega + C_1,$$

где C_1 — константа интегрирования.

Согласно предположению о наличии минимума скорости ω_0 и максимума потенциала u_0 , производная $\frac{du}{dx}$ в сечении x_0 , где $u = u_0$ и $\omega = \omega_0$, будет равна нулю. Следовательно,

$$\frac{du}{dx} = \pm \sqrt{2jm(\omega - \omega_0)/\epsilon_0 e}. \quad (5)$$

В области между $x = 0$ и $x = x_0$, где с ростом x потенциал увеличивается, производная $\frac{du}{dx}$ положительна и перед корнем в выражении (5) следует брать знак «плюс». В области от $x = 0$ до $x = x_k = L$ производная $\frac{du}{dx}$ отрицательна и перед корнем окажется «минус».

Дифференцируя (2), получим

$$du = -m\omega d\omega/e. \quad (6)$$

Используя это выражение и уравнение (5), получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{\omega d\omega}{\sqrt{2jm(\omega - \omega_0)/\epsilon_0 e}} = \pm \frac{e}{m} dx,$$

в результате интегрирования которого будем иметь

$$(\omega + 2\omega_0)\sqrt{\omega - \omega_0} = \pm \frac{3}{2} x \sqrt{2je/(\epsilon_0 m)} + C_2. \quad (7)$$

Знак «минус» в выражении (7) применим для участка, где $x < x_0$, а знак «плюс» — когда $x > x_0$. Чтобы различить первый и второй участки, будем обозначать их константы соответственно через C'_2 и C''_2 соответственно. Для первого участка ($x \leq x_0$) при $x = x_0$ скорость равна $\omega = \omega_0$ и

$$C'_2 = \left(\frac{3}{2}\right) x_0 \sqrt{2je/(\epsilon_0 m)},$$

а для второго, где $x \geq x_0$

$$C''_2 = -\left(\frac{3}{2}\right) x_0 \sqrt{2je/(\epsilon_0 m)}.$$

Следовательно, $C'_2 = -C''_2$.

С другой стороны, на участке, где $x < x_0$ при $x = 0$ скорость $\omega = \omega_0$, откуда

$$C'_2 = (\omega_a + 2\omega_0)\sqrt{\omega_a - \omega_0} = -C''_2. \quad (8)$$

Используя уравнения (7) и (8), окончательно получим

$$\begin{aligned} (\omega_a + 2\omega_0)\sqrt{\omega_a - \omega_0} \pm (\omega + 2\omega_0)\sqrt{\omega - \omega_0} = \\ = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2je}{\epsilon_0 m}} x. \end{aligned} \quad (9)$$

Знак «плюс» в этом уравнении используется, когда $x > x_0$, а «минус» — когда $x < x_0$.

Введем следующие обозначения для безразмерных скоростей: $\omega / \omega_k = \bar{\omega}$, $\omega_0 / \omega_k = \bar{\omega}_0$. Как было условлено, ω_k — скорость иона у катода. Следовательно, относительная скорость у катода $\bar{\omega}_k = 1$. Подставляя эти значения в (9), получим

$$\begin{aligned} (\bar{\omega}_a + 2\bar{\omega}_0)\sqrt{\bar{\omega}_a - \bar{\omega}_0} \pm (\bar{\omega} + 2\bar{\omega}_0)\sqrt{\bar{\omega} - \bar{\omega}_0} = \\ = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2je}{\epsilon_0 m}} \frac{L}{\omega_k^{3/2}}. \end{aligned} \quad (10)$$

При $x = L$ формула (10) принимает вид

$$\begin{aligned} (\bar{\omega}_a + 2\bar{\omega}_0)\sqrt{\bar{\omega}_a - \bar{\omega}_0} + (1 + 2\bar{\omega}_0)\sqrt{1 - \bar{\omega}_0} = \\ = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2je}{\epsilon_0 m}} \frac{L}{\omega_k^{3/2}}. \end{aligned} \quad (11)$$

В формуле (11) применяется знак «плюс», так как $L > x_0$. Относительную координату ионов в зависимости от их скорости находим путем совместного решения уравнений (10) и (11):

$$\frac{x}{L} = \frac{(\bar{\omega}_a + 2\bar{\omega}_0)\sqrt{\bar{\omega}_a - \bar{\omega}_0} \pm (\bar{\omega} \pm 2\bar{\omega}_0)\sqrt{\bar{\omega} - \bar{\omega}_0}}{(\bar{\omega}_a + 2\bar{\omega}_0)\sqrt{\bar{\omega}_a - \bar{\omega}_0} + (1 + 2\bar{\omega}_0)\sqrt{1 - \bar{\omega}_0}}. \quad (12)$$

Правило знаков в выражении (12) остается таким же, как в выражении (9). Из (12) легко получить, что относительная координата, соответствующая максимуму потенциала:

$$\frac{x}{L} = \left[1 + \frac{(1 + 2\bar{\omega}_0)\sqrt{1 - \bar{\omega}_0}}{(\bar{\omega}_a + 2\bar{\omega}_0)\sqrt{\bar{\omega}_a - \bar{\omega}_0}} \right]^{-1}. \quad (13)$$

Определим величину $\bar{\omega}_0$, соответствующую максимальной плотности тока. Для этого решим уравнение (11) относительно j :

$$\begin{aligned} j = \frac{2}{9} \epsilon_0 \omega_k^3 \frac{m}{e} L^{-2} \times \\ \times \left[(\bar{\omega}_a + 2\bar{\omega}_0)\sqrt{\bar{\omega}_a - \bar{\omega}_0} + (1 + 2\bar{\omega}_0)\sqrt{1 - \bar{\omega}_0} \right]^2. \end{aligned}$$

Продифференцируем полученное выражение по $\bar{\omega}_0$ и приравняем полученную производную нулю. В результате получим значение скорости, соответствующее максимуму плотности тока:

$$\bar{\omega}_{0\text{опт}} = \bar{\omega}_a / (1 + \bar{\omega}_a). \quad (14)$$

После подстановки значения $\bar{\omega}_{0\text{опт}}$ из (14) в предыдущую формулу установим величину максимальной плотности тока:

$$j_{\text{max}} = (1 + \bar{\omega}_a)^3 \frac{2}{9} \frac{m}{e} \frac{\epsilon_0 \omega_k^3}{L^2}. \quad (15)$$

Так как скорость ионов у катода

$$\omega_k = \sqrt{\frac{2}{1 - \bar{\omega}_a^w} \frac{e}{m} u_a},$$

то максимальная плотность тока, выраженная через потенциал анода,

$$j_{\max} = \frac{4}{9} \left(\frac{1 + \bar{\omega}_a}{1 - \bar{\omega}_a} \right)^{3/2} \left(\frac{2e}{m} \right)^{1/2} \epsilon_0 u_a^{3/2} / L^2. \quad (16)$$

Если начальная скорость $\omega_a = 0$ ($\bar{\omega}_a = 0$), то для максимальной плотности тока получается обычное уравнение Чайльда–Лэнгмюра (закон трех вторых)

$$j_{\max 0} = \frac{2}{9} \frac{m \epsilon_0 \omega_k^3}{e L^2} = \frac{4}{9} \left(\frac{2e}{m} \right)^{1/2} \frac{\epsilon_0 u_a^{3/2}}{L^2}. \quad (17)$$

Вольт-амперные характеристики рассматриваемой системы электродов рассчитываются по формуле (17) и представляют собой зависимость максимальной плотности тока от разности потенциалов на электродах при начальной скорости ионов $\bar{\omega}_a = 0$. Из уравнений (15), (16) и (17) можно заключить, что при $\omega_k = \text{const}$ и $L = \text{const}$ отношение максимальных плотностей тока при $\bar{\omega}_a \neq 0$ и $\bar{\omega}_a = 0$ имеет вид

$$\frac{j_{\max}}{j_{\max 0}} = \left(\frac{1 + \bar{\omega}_a}{1 - \bar{\omega}_a} \right)^{3/2}.$$

В результате подстановки численных значений становится очевидным, что если начальная скорость составляет 0,2 от конечной, т. е. $\bar{\omega}_a = 0,2$, то максимальная плотность тока будет в 1,74 раза больше, чем максимальная плотность тока, получаемая по (17) при $\bar{\omega}_a = 0$. В таком случае для получения заданной скорости на катоде требуемое значение потенциала u_a будет меньше, чем при начальной скорости, равной нулю. Например, при $\bar{\omega}_a = 0,2$ отношение $u_a/u_{a0} = 0,96$.

Еще большее возрастание плотности тока получается, если с ростом $\bar{\omega}_a$ поддерживать постоянным потенциал на аноде $u_a = \text{const}$. В этом случае при $\bar{\omega}_a = 0,2$ отношение $j_{\max}/j_{\max 0} = 1,84$, а скорость у катода увеличивается так, что отношение v_k/ω_{k0} будет равно 1,02.

Рассмотрим далее зависимость скорости ионов от координаты при максимальном токе. Ее легко получить путем совместного решения уравнений (12) и (14):

$$\left(\frac{x}{L} \right)_{\max} = \frac{\left\{ \begin{array}{l} \bar{\omega}_a^3 + 3\bar{\omega}_a^2 \pm [\bar{\omega}(1 + \bar{\omega}_a) + 2\bar{\omega}_a] \times \\ \times \sqrt{\bar{\omega}(1 + \bar{\omega}_a) - \bar{\omega}_a} \end{array} \right\}}{(1 + \bar{\omega}_a)^3}. \quad (18)$$

Знак «плюс» в этом уравнении используется тогда, когда $x > x_0$, а «минус» — когда $x < x_0$. При максимальном токе координата определится путем подстановки в (18) величины $\bar{\omega} = \bar{\omega}_{\text{опт}}$ из (14). В результате получаем

$$\left(\frac{x_0}{L} \right)_{\max} = \frac{(3\bar{\omega}_a^2 + \bar{\omega}_a^3)}{(1 + \bar{\omega}_a)^3}. \quad (19)$$

Напряженность электрического поля между электродами с использованием формулы (5):

$$E = \pm \sqrt{2jm\omega_k(\bar{\omega} - \bar{\omega}_0)/(\epsilon_0 e)}. \quad (20)$$

Знак «плюс» перед корнем выбирается для участка межэлектродного пространства, где $x > x_0$, а «минус» — где $x < x_0$.

Так как при максимальном токе скорость $\bar{\omega}_0$ выражается формулой (14), то напряженность поля в этом случае

$$E = \pm \sqrt{\frac{2jm}{\epsilon_0 e} \omega_k \left(\bar{\omega} - \frac{\bar{\omega}_a}{1 + \bar{\omega}_a} \right)}.$$

Следовательно, у катода

$$E_k = \sqrt{\frac{2jm}{\epsilon_0 e} \frac{\omega_k}{1 + \bar{\omega}_a}}$$

и отношение

$$\frac{E}{E_k} = \pm \sqrt{\bar{\omega}(1 + \bar{\omega}_a) - \bar{\omega}_a}, \quad (21)$$

а зависимость потенциала от скорости ионов

$$\frac{u}{u_a} = \frac{1 - \bar{\omega}^2}{1 - \bar{\omega}_a^2}. \quad (22)$$

Отношение плотности зарядов в любой точке межэлектродного пространства к плотности зарядов у катода

$$\rho / \rho_k = 1 / \bar{\omega}. \quad (23)$$

Выражения E/E_k , u/u_a и ρ/ρ_k являются функцией скорости, связь же между скоростью ионов и координатой определяется формулой (18).

На рис. 3 показано изменение в межэлектродном пространстве $\bar{\omega}$, E/E_k , ρ/ρ_k и u/u_a в зависимости от x/L при максимальном токе j_{\max} для случая, когда начальная скорость $\bar{\omega}_a = 0$ (штриховые линии) и для случая, когда начальная скорость $\bar{\omega}_a = \omega_a / \omega_k = 0,2$ (сплошная линия). Обращает

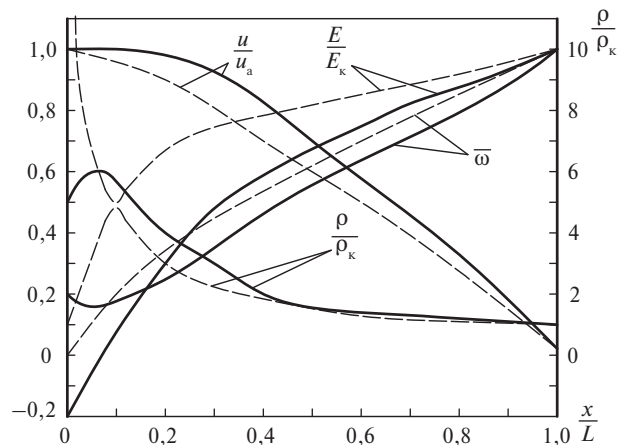


Рис. 3. Параметры движения ионов в межэлектродном зазоре

на себя внимание, что при $\omega_a \neq 0$ плотность зарядов ρ/ρ_k имеет везде конечное значение, в то время как при $\bar{\omega}_a = 0$ плотность зарядов у анода стремится к бесконечности.

Следует отметить, что полученные выражения для движения ионов справедливы для случая, когда скорость ионов у анода меньше, чем у катода ($\bar{\omega}_a = \omega_a / \omega_k < 1$ и $u_a < u_k$), так и для случая, когда скорость у анода больше, чем у катода ($\omega_a > 1$ и $u_a > u_k$).

Таким образом, полученные рассуждения позволяют сделать следующие выводы:

1. Проектирование движителей ионов озона должно осуществляться с учетом соотношения начальной и текущей скорости движения ионов, их расположения по отношению к аноду и катоду, а также напряженности электрического поля и плотности зарядов.

2. По мере увеличения начальной скорости ионов происходит возрастание плотности тока. Удаление ионов от анода сопровождается умень-

шением потенциала, ростом напряженности поля и уменьшением плотности зарядов.

3. Устройство электростатического движителя должно быть выполнено таким образом, чтобы скорость ионов озона на выходе из укоряющего электрода оказалась максимальной.

Список литературы

1. Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А. Ресурсосберегающее автономное теплоснабжение объектов АПК // Международный научный журнал. — 2011. — № 5. — С. 83–91.
2. Отопительный котел: пат. РФ № 119860 / С.А. Андреев, Ю.А. Судник, Е.А. Петрова, Д.А. Нормов. — Опубл. 27.08.2012, Бюл. № 24.
3. Отопительный котел: положительное решение ФИПС РФ / С.А. Андреев, Ю.А. Судник, Е.А. Петрова, Н.И. Гурецкий. — № 2012153818 от 13.12.2012.
4. Фаворский О.Н., Фишгойт В.В., Янговский Е.И. Основы теории космических электрореактивных двигательных установок: учеб. пособие для вузов; под ред. О.Н. Фаворского. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1978. — 384 с.

УДК 620:9

Е.А. Муравлёва

С.П. Рудобаишта, доктор техн. наук

Московский государственный агроинженерный университет имени В.И. Горячкина

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ФЕРМЕРСКОГО ДОМА НА ОСНОВЕ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

На территории страны находится большое число обособленных фермерских домов, удаленных от энергосистем регионального или федерального значения, так значительная часть северо-восточной территории Российской Федерации не охвачена централизованным электроснабжением [1]. Снабжение обособленных фермерских домов необходимой электроэнергией в таких регионах осуществляется в большинстве случаев с помощью дизель-генераторов и полноценное энергообеспечение данных потребителей требует большого объема топлива, доставка которого чрезвычайно дорога [2]. Применение ветровых электроустановок малой мощности можно рассматривать как вариант, позволяющий снизить затраты на электроснабжение обособленных фермерских домов.

Энергетический потенциал ветра на территории России составляет около 10 млн т условного топлива в год. Скорость ветра является случайной переменной, изменяющейся по поверхности Земли, высоте и времени, тем не менее среднестатистические ветроэнергетические характеристики доста-

точно стабильны по отдельным регионам и периодам времени [3].

Для исследования эффективности электроснабжения фермерского дома на основе ветроэлектрической установки малой мощности было выбрано 11 регионов России, расположенных в районе городов Псков, Санкт-Петербург, Астрахань, Сочи, Красноярск, Чита, Якутск, Салехард, Петропавловск-Камчатский, Владивосток, Екатеринбург.

Потенциал ветроэнергетики в указанных регионах распределен не равномерно. Существуют регионы с достаточно высоким среднегодовым показателем: скорость ветра v вблизи таких городов, как Владивосток, равна 14,8 м/с, Петропавловск-Камчатский — 14,7 м/с. В то время как в регионе города Сочи средняя годовая скорость ветра не превышает 1,9 м/с, что является наименьшим показателем из представленных регионов. Средними показателями среднегодовой скорости ветра обладают регионы вблизи Пскова (6,2 м/с), Санкт-Петербурга (12 м/с), Астрахани (11,2 м/с), Красноярска (7,8 м/с), Читы (8,9 м/с), Якутска (5,4 м/с), Сале-