

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ТУРБУЛИЗАЦИЕЙ СТРУЙ УНИПОЛЯРНЫМИ ПОТОКАМИ ИОНОВ

*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
ул. Политехническая, 29, 195251, г. Санкт-Петербург, Россия*

подавляющее большинство технических систем управления и сбора информации физически неоднородно, то есть состоит из подсистем и объектов, имеющих разную физическую природу (электрическую, гидравлическую, пневматическую, механическую). Связь этих подсистем друг с другом происходит посредством преобразователей рода энергии сигналов (ПРЭС), как правило, в настоящее время с использованием подвижных механических и электромеханических элементов. Наличие подвижных перемещающихся с трением механических и электромеханических элементов существенно снижает быстродействие преобразователей (устройств интерфейса), вызывает гистерезис, зону нечувствительности, сухое трение, что делает управление неоднозначным, снижает надежность систем.

Для качественного улучшения характеристик ПРЭС необходимо, прежде всего, устранить из процесса преобразования сигналов подвижные механические и электромеханические элементы [1].

В статье рассматриваются электрофизические основы разработки принципиально новых методов непосредственного (без использования подвижной механики) электрогазодинамического (ЭГД) преобразования электрических сигналов в пневматические сигналы в электропневматических системах управления на базе гидродинамической неустойчивости и турбулизации струй рабочих газов соответствующим образом организованными ЭГД воздействиями – созданием униполярных потоков ионов того или иного знака в резко неоднородных электрических полях.

В электропневматических преобразователях с турбулизацией струи потоком ионов (ЭПП ТС) преобразование электрического сигнала в пневматический осуществляется путем ЭГД изменения режима течения газа – турбулизацией ламинарной газовой струи с использованием направленного потока ионов между электродами в резко неоднородном поперечном к струе электрическом поле. При этом входным электрическим сигналом служит напряжение или ток между электродами, а в качестве выходного пневматического сигнала – изменение давления (расхода) газа в приемном сопле ЭПП ТС, которое при увеличении напряжения на электродах начинает быстро уменьшаться (при постоянном давлении питания) вследствие уменьшения усредненной кинетической энергии потока, попадающего в приемное сопло при турбулизации струи потоком ионов.

Оценим качественно порядок величин электрических параметров, необходимых для реализации ЭГД управления в предположении, что плотности электрической и газодинамической энергии должны быть соизмеримы:

$$\rho_{e0} E_0 l_0 = \rho v_0^2 / 2. \quad (1)$$

Здесь  $l_0$  – характерный линейный размер (например, расстояние между электродами);  $v_0$  – скорость струи газа;  $\rho$  – плотность газа;  $\rho_{e0}$  – объемная плотность электрического заряда в ионном потоке;  $E_0$  – максимально возможная величина электрического поля, при которой еще не происходит искровой пробой межэлектродного промежутка (искровой пробой является нерабочим режимом преобразователей).

Из (1) находим необходимую величину объемной плотности электрического заряда, которую требуется внести в ионный поток для эффективного ЭГД управления:

$$\rho_{e0} = \rho v_0^2 / (2E_0 l_0). \quad (2)$$

Величину  $l_0$  выбираем с учетом требований минимизации размеров ЭГД устройств и ограничения на величину напряжения на электродах преобразователей. Пусть  $l_0 = 10^{-3}$  м,  $v_0 = 1$  м/с, а плотность рабочего газа  $\rho \sim 1$  кг/м<sup>3</sup>. Тогда из (2) следует, что необходимая объемная плотность электрических зарядов в газе при  $E_0 = 10^6$  В/м будет  $\rho_{e0} = 5 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>3</sup>. При этом количество ионов в 1 м<sup>3</sup> газа равно  $\rho_e / e = 3 \cdot 10^{15}$ . Здесь  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона. Так как в 1 м<sup>3</sup> газа при нормальных условиях содержится приблизительно  $10^{25}$  молекул, отношение заряженных молекул к нейтральным (степень ионизации) составляет порядка  $10^{-8}$  %. Следовательно, для реализации ЭГД управления достаточна малая степень ионизации потока.

Таких величин (степени ионизации) можно достичь, используя рентгеновские лучи, ультрафиолетовое облучение, радиоактивные вещества, неравновесную ионизацию, обнаруженную в пламени, электрокинетические явления или внешнюю область коронного разряда в газах и его аналога в жидкостях. Желательно, чтобы выбранный источник ионизации мог обеспечить (при необходимости) равномерное распределение ионов в струе или потоке, достаточно долгое время их жизни, возможность точного контроля имеющейся ионизации, безопасность работы обслуживающего персонала. Это достигается с помощью коронного разряда в газах [1–4]. Интересное свойство коронного разряда заключается в том, что процессы образования электронов и ионов в результате ударной ионизации газа происходят только в узком коронирующем слое в непосредственной близости от электрода с большой кривизной, а в так называемой внешней области коронного разряда, расположенной за коронирующим слоем, наблюдается униполярный поток ионов знака потенциала коронирующего электрода, направленный к другому электроду.

Отметим, что с помощью коронного разряда можно создать необходимые для ЭГД управления объемные плотности заряда при разработке ЭПП ТС. Пусть устройство для сообщения заряда потокам рабочей среды представлено в виде концентрических металлических сфер радиусов  $r_0$ ,  $r_1$  ( $r_0 \ll r_1$ ), к которым приложено напряжение. В этом случае уравнение Пуассона записывается в виде

$$2E_r / r + dE_r / dr = \rho_e / (\varepsilon_0 \varepsilon), \quad (3)$$

где  $\varepsilon_0 \varepsilon$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость рабочей среды;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $E_r$  – напряженность электрического поля в пространстве между сферами;  $r$  – текущий радиус.

Качественно оценим порядок максимально достижимой плотности заряда на внешней границе коронирующего слоя, для чего в первом приближении в пределах внутренней области короны принимаем  $E_r = E_{\max} = \text{const}$ . Тогда из уравнения (3) получим

$$\rho_{e\max} = 2\varepsilon_0 \varepsilon E_{\max} / r. \quad (4)$$

Максимальное значение напряженности электрического поля будет у электрода с минимальным радиусом кривизны, то есть у коронирующего электрода во внутренней области короны, где имеет место биполярная проводимость. Однако нас интересует поток униполярных ионов во внешней области короны, поэтому в (4)  $E_{\max}$  – напряженность на границе внутренней зоны короны.

Приняв  $r = r_K$ , где  $r_K$  – внешний радиус коронирующего слоя, в котором происходит ударная ионизация, для максимальной плотности униполярного заряда получим выражение

$$\rho_{e\max} = 2\varepsilon_0 \varepsilon E_{\max} / r_K. \quad (5)$$

Для воздуха  $\varepsilon_0 \varepsilon \sim 10^{-11}$  Ф/м и  $E_{\max} \sim 10^6$  В/м. При  $r_K = 10^{-4} - 10^{-3}$  м, что, как правило, имеет место в ЭГД преобразователях, из (5) получим  $\rho_e \max \sim 10^{-1} - 10^{-2}$  Кл/м<sup>3</sup>, при которых возможна реализация ЭГД управления потоками газов.

В ряде случаев можно пренебречь толщиной коронирующего слоя и в выражении (5) в первом приближении полагать  $r_K \approx r_0$ . Тогда

$$\rho_{e\max} \approx 2\varepsilon_0 \varepsilon E_{\max} / r_0. \quad (6)$$

Таким образом, для повышения эффективности работы ЭГД преобразователей при использовании коронного разряда с учетом (6) необходимо выбирать возможно меньший радиус закругления коронирующего электрода.

Полученные этим способом плотности заряда соответствуют  $\rho_{e0}$ , найденному из условия (1) соизмеримости газодинамических и электрических сил, и оказываются достаточными для управления ЭГД преобразователями.

Величина как создаваемой при ЭГД управлению силы, так и выходной газодинамической мощности ЭПП ТС ограничена и зависит от введенного в рассмотрение на основании (1) безразмерного параметра ЭГД-взаимодействия  $N$ , представляющего собой отношение объемных плотностей электрической и газодинамической энергий:

$$N = \frac{\rho_{e0} E_0 l_0}{\rho v_0^2}. \quad (6,а)$$

В математических моделях ЭГД преобразователей с изменением режимов течения потоков этот параметр входит в правую часть уравнения типа Навье-Стокса. Диапазон изменения параметра ЭГД-взаимодействия (6,а) для конкретных типов преобразователей зависит от электрофизических параметров рабочих сред (диэлектрической проницаемости, подвижности ионов того или иного знака, коэффициента диффузии ионов), выбранного характерного линейного размера  $l_0$  и рабочего диапазона напряженностей поля  $E_0$  между электродами в зависимости от их конфигурации.

Применение резко неоднородных сильных электрических полей (коронного разряда) при реализации ЭПП ТС позволяет совместить во времени процессы сообщения газу униполярного заряда  $\rho_e$  и создания управляющей объемной силы  $F = \rho_e \cdot E$ , это упрощает конструкцию и электрическую схему ЭПП. Здесь  $E$  – средняя напряженность поля, приложенная к потоку рабочей среды (поля во внешней области короны).

Оценим предельные значения давления и температуры окружающей среды, при которых сохраняется работоспособность ЭПП ТС с управляющим униполярным потоком ионов, создаваемым с помощью коронного разряда в воздухе.

В рамках принятой в настоящее время теории Таунсенда-Роговского число ионизаций, осуществляемых в коронирующем слое электронами на единичном пути вдоль силовых линий электрического поля, характеризуется коэффициентом ударной ионизации электронами  $\alpha_e$ , определяемым произведением среднего числа столкновений в единице длины на вероятность ионизации электронным ударом при столкновении. При этом должно выполняться условие  $w_e > w_u$ , где  $w_u$  – энергия ионизации рабочих газов,  $w_e$  – энергия электронов.

В электроотрицательных газах и их смесях, каким является воздух, атомы и молекулы могут присоединять лишний электрон, образуя устойчивый отрицательный ион. Поэтому

$$\alpha_{ef} = \alpha_e - \alpha_{п}, \quad (7)$$

где  $\alpha_{ef}$  – эффективный коэффициент ударной ионизации электронами, определяющий процесс размножения электронов при ударной ионизации;  $\alpha_{п}$  – коэффициент, характеризующий процесс присоединения электронов. При  $\alpha_{ef} > 0$  начинается ударная ионизация. При этом в ЭПП ТС нормальный режим функционирования, связанный с обеспечением условия ударной ионизации и получения стабильного потока ионов во внешней области короны, определяется соотношением

$$E/p \geq c, \quad (8)$$

где  $c$  – постоянная величина для выбранного рабочего газа. Для воздуха  $c = 23,8-26,3$  В/(м·Па) [2].

При радиусах закругления игольчатых электродов порядка  $10^{-5}$  м напряженность электрического поля в коронирующем слое составляет примерно  $(3-5) \cdot 10^7$  В/м. Поэтому из (8) следует, что диапазоны давлений окружающей среды, в которых могут работать ЭПП ТС, относительно велики и обеспечивают нормальное функционирование преобразователей не только при атмосферном, но и при повышенных давлениях окружающей среды.

Определим условия, обеспечивающие применимость метода ЭГД, управления потоками газа при изменении его температуры. Эффективный коэффициент ударной ионизации (7) является функцией напряженности  $E$  электрического поля в коронирующем слое и давления  $p$  окружающей среды. Для большинства газов вблизи порогового значения в первом приближении можно записать [2, 3]:

$$\alpha_{ef} = \frac{aT_0}{\rho_0 p_0 T} \left( E - c \frac{\rho_0 p_0 T}{T_0} \right)^2, \quad (9)$$

где коэффициент  $a$  совместно с показателем степени определяет скорость возрастания  $\alpha_{ef}/p$  при увеличении  $E/p$  после порогового значения;  $\rho_0$  – относительная плотность газа.

Для начала ударной ионизации электронами необходимо, чтобы коэффициент ударной ионизации стал больше нуля. Полагая  $\alpha_{ef} \approx 0$ , с учетом того, что  $aT_0/(\rho_0 p_0 T) \neq 0$ , из (9) получаем условие применения ЭГД управления при изменении температуры окружающей среды:

$$ET_0 / (\rho_0 p_0 T) \geq c. \quad (10)$$

Из (8) и (10) следует, что метод ЭГД преобразования рода энергии сигналов, используемый для построения ЭПП ТС, применим в широком диапазоне давления и температуры окружающей среды. Например, для преобразователей, работающих на воздухе, при  $E \approx 10^7$  В/м,  $T_0 = 293$  К,  $\rho_0 = 1$  кг/м<sup>3</sup>,  $p_0 = 101,3$  кПа,  $c = 23,8$  В/(м·Па) из (10) заключаем, что температура воздуха может меняться до нескольких тысяч градусов Кельвина. При этом необходимо учитывать термоавтоэлектронную эмиссию [2]. Однако ЭГД преобразователи, как и традиционные, требуют применения известных методов компенсации неблагоприятного влияния на их характеристики температуры окружающей среды.

Для получения не только импульсных, но и потенциальных сигналов на выходе ЭПП ТС без их усложнения прежде всего необходимо обеспечить поток униполярных ионов в течение времени существования электрических сигналов на входе преобразователя. Это осуществляется при выполнении условия самостоятельности коронного разряда, при котором для его поддержания не требуется какого-либо дополнительного внешнего ионизатора. Данное условие аналитически записывается в виде [2, 3]:

$$\int_0^{l_k} \alpha_{ef} dx = K \cong \text{const}, \quad (11)$$

где  $l_k$  – длина силовой линии поля в пределах коронирующего слоя;  $x$  – путь лавины электронов (от катода при отрицательной короне и внешней границы коронирующего слоя к аноду при положительной короне). При этом значения  $K$  в (11) при различных знаках коронирующего электрода могут отличаться в 2-3 раза [2]: для положительного потенциала (положительная корона)  $K \approx 18-20$ , в то время как для отрицательной короны  $K = \ln [(1 + \gamma) / \gamma] = 8 - 9,2$ . Здесь  $\gamma$  – обобщенный коэффициент вторичной ионизации, характеризующий количество электронов, в среднем образовавшихся в коронирующем слое либо в процессе ионизации вторичными электронами (вторичная ионизация), освобожденными из катода при ударе о поверхность положительных ионов первоначальной лавины, либо за счет фотоионизации на поверхности катода излучением из начальной лавины, либо за счет фотоионизации в объеме газа коротковолновых излучений лавины.

При выполнении условия (11) в ЭПП ТС возникает устойчивый поток ионов во внешней области коронного разряда, которому соответствуют определенные величины напряженности электрического поля возле игольчатого электрода и напряжения на электродах, которые называются начальной напряженностью  $E_k$  и начальным напряжением  $U_k$  возникновения короны.

Синтез ЭПП ТС предполагает прежде всего знание рабочего диапазона изменений напряжений на электродах преобразователей и его зависимости от конструктивных параметров и параметров рабочей среды. Это вытекает из физических особенностей работы ЭГД преобразователей, характерной чертой которых является ограничение напряжения  $U$  на электродах по верхнему уровню напряжением искрового пробоя  $U_{np}$  межэлектродного промежутка. Нижний же уровень  $U_k$ , отличный от нуля, определяет начало электрогазодинамических явлений (создание устойчивого униполярного потока ионов при выполнении (11)), положенных в основу построения ЭПП ТС. Поэтому  $U_k$  влияет на статические и динамические характеристики, определяя момент начала изменения выходного сигнала. В свою очередь, зная диапазон изменения напряжения на электродах, можно обоснованно сформулировать требования к разработке высоковольтных усилителей, входящих в структуру ЭПП ТС.

Таким образом, рабочий диапазон напряжения  $U$  на электродах ЭПП ТС изменяется в пределах

$$U_k \leq U < U_{np}, \quad (12)$$

где  $U_k$  – начальное напряжение коронного разряда в рабочем газе;  $U_{np}$  – напряжение искрового пробоя межэлектродного промежутка.

Для смягчения требований к электрической части ЭПП ТС диапазон напряжений (12) желательно выбирать максимально возможным. Оптимальным считается такой ЭПП ТС, в котором конструктивные и другие параметры обеспечивают минимальную величину напряжения  $U_k$  возникновения короны и максимальное напряжение искрового пробоя  $U_{np}$ .

Расширить возможный диапазон изменений на электродах ЭПП ТС можно прежде всего за счет схемных решений при соответствующем выборе полярности коронирующего электрода.

Существенное различие значений правой части выражения (11) для положительной и отрицательной корон на величину  $E_k$  влияет незначительно [2]. Для отрицательной короны эта величина будет меньше, чем для положительной [2]. Соответственно значение  $U_k$  для отрицательной короны будет меньше, чем для положительной.

Поскольку при положительном потенциале игольчатого электрода ширина зоны высоких напряжений поля больше [2], чем при отрицательном, то с повышением напряжения на электродах ЭГД преобразователей развитие стримеров при отрицательном потенциале иглы будет происходить на меньшую длину межэлектродного промежутка. Это приводит к тому, что в случае положительной короны искровой пробой возникает при меньшем напряжении  $U_{np}$  на электродах, чем при отрицательной короне. С учетом того, что напряжения  $U_k$  возникновения положительной и отрицательной короны в первом приближении одинаковы, можно сделать заключение о более узком рабочем диапазоне (12) напряжения положительной короны.

Выбором конструктивных параметров ЭГД преобразователей (прежде всего радиуса закругления  $r_0$  игольчатого электрода) можно существенным образом изменять рабочий диапазон напряжений.

С уменьшением расстояния  $h$  между электродами величина  $U_{np}$  уменьшается быстрее, чем  $U_k$ , что приводит к уменьшению рабочего диапазона (12). Поэтому при дальнейшем уменьшении  $h$ , начиная с некоторого критического расстояния  $h_0$  между электродами, корона не появляется, а сразу происходит искровой пробой, то есть рабочий диапазон напряжений  $U$  равен нулю. Следовательно, в ЭГД преобразователях отношение  $h/r_0$  должно быть больше определенной величины  $h/r_0 > h_0/r_0$ . Например, для коаксиальных электродов соотношение радиусов, при которых образуется коронный разряд в воздухе, должно удовлетворять условию [6]  $R/r_0 = (h + r_0) / r_0 > 2,718$ .

При увеличении давления  $p$  окружающей среды диапазон рабочего напряжения (12) на электродах ЭПП ТС при выбранных геометрических размерах межэлектродного промежутка увеличивается. Это объясняется тем, что с повышением  $p$  величина  $U_{np}$  растет быстрее, чем  $U_k$ .

Динамика возникновения коронного разряда в ЭПП ТС, как и в других известных случаях (высоковольтных аппаратах [3]), определяется статистическим временем запаздывания разряда  $t_c$  при достижении  $U_k$  (характеризующего момент появления свободного электрона, способного начать ударную ионизацию) и временем  $t_\phi$  формирования коронного разряда. Поскольку в ЭПП ТС имеют место малые расстояния между электродами, то  $t_\phi \ll t_c$  и время возникновения коронного разряда  $t_p = t_c + t_\phi \approx t_c$ . При этом  $t_p$  не превышает нескольких микросекунд. Поэтому при анализе динамики ЭПП ТС им можно пренебречь.

При управлении турбулизацией затопленной струи газа в ряде случаев необходимо предусмотреть свободный проход через другой электрод потока газа, вызванного движением ионов от игольчатого электрода. Конструктивно это реализуется выбором другого электрода в виде металлической плоскости с отверстием, которая укреплена в диэлектрическом корпусе так, что расстояние от конца иглы до металлической плоскости существенно (в 5–7 раз) меньше, чем до диэлектрических стенок корпуса. Для исключения влияния поверхностного заряда, адсорбирующегося на диэлектрике при работе такого ЭГД преобразователя, диэлектрические стенки в электропневматических преобразователях должны отстоять относительно далеко от игольчатого электрода.

В другом случае, чтобы исключить адсорбцию заряда на стенках корпуса и уменьшить габариты, целесообразно изготовить внутренние стенки корпуса совместно с металлическим соплом. Таким образом, боковые стенки имеют потенциал земли. Для устранения возникновения коронного разряда с иглы на боковые стенки необходимо, чтобы радиус корпуса был также больше расстояния от иглы до сопла, но уже не в 5–7 раз, как в варианте с диэлектрическими стенками, а не более чем в 1,5–2 раза. При этом максимальное выходное давление в сопле такой элементарной ступени составляет 60–70 Па. Это вдвое меньше, чем в случае „открытых“ электродов, однако по сравнению с предыдущим вариантом это устройство существенно компактнее и отличается высокой стабильностью характеристик, поскольку в ней полностью исключено влияние поля поверхностных зарядов на стенках корпуса.

Прежде всего проанализируем влияние отверстия в плоском электроде на распределение электрического поля в непосредственной близости от игольчатого электрода. Для этого использован разработанный Демирчяном [5] способ аналогового моделирования электростатических полей реальных электродных систем в электролитической ванне, который позволяет моделировать на основании выражения для оператора Лапласа любой сложный контур границы области (в том числе и отверстия) и прост при реализации. Данный метод полностью исключает идеализацию реальной электродной системы, обеспечивая геометрическое подобие игольчатого и плоского электродов, граничных условий, а также высокую точность (в несколько десятков процентов) при тщательном выполнении модели и хороших навыках работы. На рис. 1 в качестве примера представлена полученная таким образом типовая зависимость  $U/U_0$ , характеризующая распределение поля вдоль оси симметрии, от диаметра отверстия  $d_0$  в плоском электроде, где  $U_0$  – потенциал в непосредственной близости от игольчатого электрода;  $U$  – текущий потенциал.

Следовательно, для расчета начального напряжения  $U_k$  возникновения коронного разряда в системе электродов с диэлектрическими твердыми стенками, относительно далеко отстоящими от игольчатого электрода, можно применить общую расчетную модель, характерную для электродов типа игла–плоскость (без отверстия).

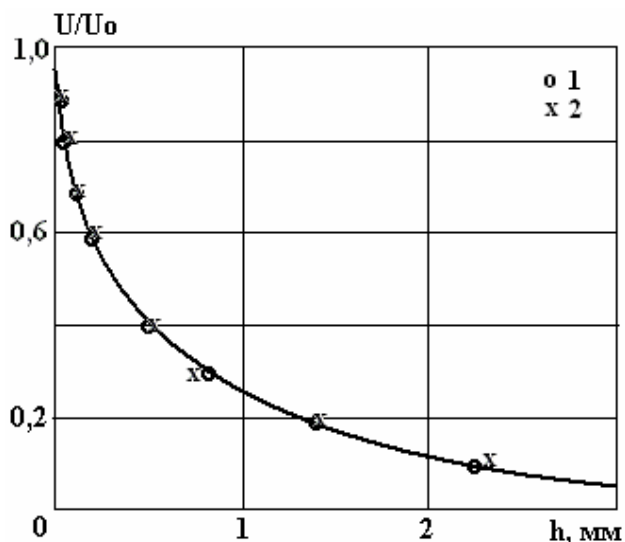


Рис. 1. Влияние диаметра отверстия в плоском электроде на распределение потенциала в межэлектродном промежутке «игла–плоскость с отверстием» в ограниченных диэлектрическими твердыми стенками объемах газа при  $r_0 = 0,05$  мм:  $d_0$ , мм: 1–1; 2–4

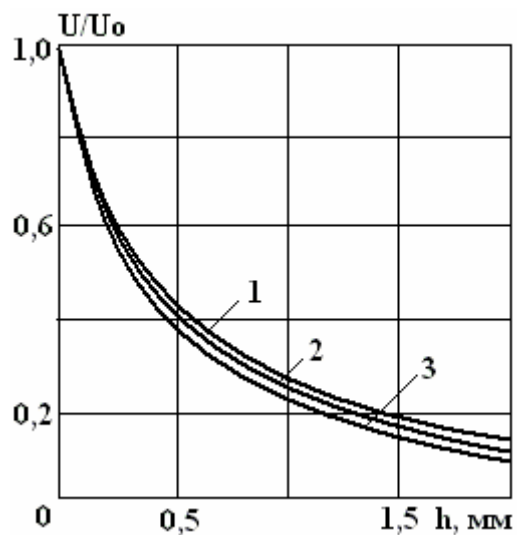


Рис. 2. Результаты моделирования в электролитической ванне влияния торцевого отверстия в металлическом корпусе на распределение потенциала в непосредственной близости от острия в электродных системах ЭГД преобразователей:  $d_c$ , мм: 1–8; 2–1,4; 3–0,8

Результаты аналогового моделирования полей в электролитической ванне реальных электродных систем ЭПП ТС в металлическом корпусе также показали, что наличие в металлическом корпусе торцевого отверстия, расположенного по оси игольчатого электрода, практически не оказывает влияния на распределение потенциала и напряженности электрического поля в непосредственной близости от конца иглы. На рис. 2 представлены типичные зависимости распределения поля от диаметра отверстия сопла  $d_c$  в торце металлического корпуса. Поэтому для вычисления  $U_k$  на электродах ЭПП ТС при такой организации движения униполярных потоков ионов можно, как и в случае расположения электродов типа игла–плоскость в диэлектрическом корпусе, ориентироваться на единую расчетную модель без учета соосного игле отверстия в торце металлического корпуса.

Для уточнения распределения электрического поля при малых межэлектродных расстояниях (до 5–6 мм) и изменениях радиуса закругления игольчатого электрода  $r_0$  от  $0,5 \cdot 10^{-2}$  до  $9,0 \cdot 10^{-2}$  мм (что имеет место в ЭПП ТС) были проведены расчеты электрических полей между электродами типа игла–плоскость до момента возникновения коронного разряда численным решением на ЭВМ уравнения Лапласа по методам неравномерных сеток и эквивалентных зарядов [4]. Проведенные исследования показали [6], что в этом случае практически на всем межэлектродном промежутке

присутствует неоднородное электрическое поле с резким усилением непосредственно возле электрода с малым радиусом  $r_0$  кривизны.

Кроме того, внутренняя область коронного разряда  $x_k$  (где эффективный коэффициент ионизации  $\alpha_{ef} > 0$  – см. выражения (7), (11)) становится соизмеримой с расстоянием между электродами. Это подтверждают полученные в первом приближении выражения для толщины  $x_k$  внутренней области короны, найденные из условия равенства нулю эффективного коэффициента ионизации (11) на внешней границе коронирующего слоя с использованием метода Ламе при различных аппроксимациях реальных электродных систем ЭПП ТС софокусными гиперболами вращения (в случае размещения электродов в диэлектрическом корпусе) и софокусными эллипсоидами вращения (при размещении электродов в металлическом корпусе).

При аппроксимации электродной системы ЭПП ТС софокусными гиперболами вращения аналогично [7] имеем

$$x_k = h - \left[ (h^2 + r_0 h) - \frac{2 U \sqrt{h^2 + r_0 h}}{c' \rho_0 \ln \frac{\sqrt{h^2 + r_0 h} + h}{\sqrt{h^2 + r_0 h} - h}} \right]^{0.5}, \quad (13)$$

где  $h$  – расстояние между электродами;  $c' = c \rho_0$ . При нормальных атмосферных условиях для воздуха [3]  $c' = 24,11 \cdot 10^3$  В/см.

В случае, если расчетную модель системы электродов представить в виде софокусных эллипсоидов вращения, легко получить [6]:

$$x_k = \left[ (h_0^2 - r_0 h_0) + \frac{2 U \sqrt{h_0^2 - r_0 h_0}}{c' \rho_0 \ln \frac{(h_0 + \sqrt{h_0^2 - r_0 h_0})(h_2 - \sqrt{h_0^2 - r_0 h_0})}{(h_0 - \sqrt{h_0^2 - r_0 h_0})(h_2 + \sqrt{h_0^2 - r_0 h_0})}} \right]^{0.5} - h_0, \quad (14)$$

где  $h = h_2 - h_0$  – расстояние между электродами;  $h_0$  – координата конца игольчатого электрода с радиусом закругления  $r_0$ ;  $h_2$  – координата электрода типа плоскость.

При этом вторая полуось внутреннего эллипсоида, аппроксимирующего толщину иглы, находится через радиус кривизны  $r_0$  вершины эллипсоида так, чтобы он соответствовал радиусу кривизны игольчатого электрода  $b_1 = \sqrt{r_0 h_0}$ , а начало координат до фокуса эллипсоида определяется как  $a_1 = \sqrt{h_0^2 - r_0 h_0}$ .

Уравнения (13) и (14) выполняются при напряжении на электродах, равном начальному напряжению возникновения коронного разряда в межэлектродном промежутке.

Расчеты по (13) и (14) при указанных выше диапазонах изменения  $r_0$  и  $h$  показывают, что толщина внутренней области короны становится соизмеримой с расстоянием между электродами ЭПП ТС.

Таким образом, характерной электрофизической особенностью функционирования электропневматических преобразователей с турбулизацией струи потоком униполярных ионов во внешней области коронного разряда является соизмеримость внешней и внутренней областей короны при имеющих место малых расстояниях между электродами ЭПП ТС. При этом электрическое поле является неоднородным на всем межэлектродном промежутке ЭПП ТС.

Поэтому для определения начального напряжения  $U_k$  на электродах ЭПП ТС в выражении (12) по начальным напряженностям поля короны  $E_k$  известные выражения для  $E_k$  (формулы Пика, Таунсенда, Леша, Александрова, Энгеля и Штенбека и др. [2–4]) являются неприемлемыми, поскольку не учитывают эти факторы и дают большие погрешности с результатами экспериментов [6]. Для определения рабочего диапазона изменения напряжения на электродах (12), расчета статических и динамических характеристик ЭПП ТС используется более точная формула для  $E_k$  [6, 7], которая учитывает зависимость  $E_k$  от расстояния  $h$  между электродами при малых межэлектродных промежутках:

$$E_{\kappa} = A \rho_0 + B \sqrt{h \rho_0 / r_0} , \quad (15)$$

где  $A = c \rho_0 T / T_0$ ;  $B = \sqrt{K \rho_0 T / (a d T_0)}$ ; коэффициенты  $a$ ,  $c$  находятся из (9) вблизи порогового значения  $(E/p)_a$ ;  $K$  определяется из условия (11) самостоятельности коронного разряда в рабочем газе;  $d$  – эмпирический коэффициент, характеризующий расстояние от электрода с малым радиусом кривизны  $r_0$ , в пределах которого до момента возникновения коронного разряда электрическое поле вблизи порогового значения  $E/p$  имеет ярко выраженную неоднородность по длине межэлектродного промежутка (максимальный коэффициент усиления).

Таким образом, в результате проведенных исследований:

- сформулированы электрофизические основы разработки новых методов электрогазодинамического преобразования электрических сигналов в пневматические при физически неоднородных системах управления на базе гидродинамической неустойчивости и турбулизации струй газа созданием во внешней зоне коронного разряда униполярного потока ионов при малых межэлектродных промежутках и различных характерных конфигурациях электродов;
- обобщены электрофизические механизмы взаимосвязи работы электропневматических преобразователей с турбулизацией струи потоком ионов в статических и динамических режимах и их влияние на рабочий диапазон изменения напряжения на электродах ЭПП ТС;
- представлены результаты моделирования и численного расчета распределений резко неоднородных электрических полей в ограниченных твердыми стенками (как диэлектрическими, так и металлическими) электродных систем типа игла–плоскость при малых межэлектродных промежутках, имеющих место в ЭПП ТС;
- на основании этих результатов предложена новая формула для определения начальной напряженности электрического поля возникновения короны, более полно учитывающая электрофизические механизмы получения униполярных потоков ионов в малых межэлектродных промежутках, расчеты по которой хорошо согласуются с экспериментальными данными [6];
- сформулированы условия получения стабильного потока униполярных ионов в рабочих газах (воздухе) в резко неоднородном электрическом поле при малых межэлектродных промежутках различной конфигурации, имеющих место в электропневматических преобразователях с турбулизацией струи потоком униполярных ионов.

**Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в соответствии с проектом № 06-08-01234-а.**

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Нагорный В.С., Денисов А.А.* Устройства автоматики гидро- и пневмосистем. М.: Высшая школа. 1991. 367 с.
2. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
3. Техника высоких напряжений / Под ред. Д.В. Разевига. М.: Энергия, 1976. 488 с.
4. *Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабемян Г.З., Пашин М.М.* Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М.: Энергия. 1974. 480 с.
5. *Демирчян К.С.* Моделирование магнитных полей. Л.: Энергия. 1974. 283 с.
6. *Нагорный В.С.* Начальная напряженность электрического поля возникновения коронного разряда при малых межэлектродных промежутках. *Электричество*. 2004. № 12. С. 8–11.
7. *Нагорный В.С.* Исследования процессов сообщения электрического заряда каплям диэлектрических жидкостей в резко неоднородном электрическом поле коронного разряда // *Электронная обработка материалов*. 2006. № 2. С. 13–19.

*Поступила 19.12.06*

## Summary

Based on modeling and numerical calculations, formulated are electrophysical principles for development of innovative electrogasdynamic electropneumatic converters using turbulization of gas jets by a unipolar ion flow induced in the external area of the corona discharge within narrow inter-electrode gaps and with different electrode configurations.