

УДК 538.3:532:538.4

ЭЛЕКТРОГАЗО- И ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ СТРУЯМИ И ПОТОКАМИ ГАЗА И ЖИДКОСТИ

2. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В. С. Нагорный

Санкт-Петербургский государственный технический университет, 195251 Санкт-Петербург

Рассмотрены электрофизические основы применимости метода электрогазо- и электрогидродинамического преобразования электрических сигналов в пневматические (гидравлические) сигналы и наоборот при управлении струями и потоками газа и жидкости в электропневмогидравлических системах, включая вопросы формулирования требований к рабочим средам и электрической части преобразователей, оценки предельных диапазонов изменения давлений, скорости и температур рабочей среды, предельных динамических возможностей, определения условий получения потенциальных сигналов, стабильности управления и расширения диапазонов управления.

1. В работе [1] показано, что величина объемной силы при ЭГД-управлении струями и потоками газа и жидкости не может быть произвольной, что накладывает ограничение на величину газо- или гидродинамической мощности, получаемой на выходе ЭГД-преобразователей.

Величина как создаваемой при ЭГД-управлении силы, так и выходной газо- или гидродинамической мощности зависит от безразмерного параметра ЭГД-взаимодействия N , представляющего собой отношение объемных плотностей электрической и газо- или гидродинамической энергий. В математических моделях ЭГД-преобразователей этот параметр входит в правую часть уравнения типа Навье — Стокса (формула (2.7) в [1]). Поясним на примерах зависимость характеристик преобразователей от N .

Даже при максимально возможных E_0 и ρ_{e0} , как следует из формулы (3.1) в работе [1], при ЭГД-управлении максимальная скорость v_0 потока рабочей жидкости не может превышать 3–4 м/с, а потока газа — 6–10 м/с. Поэтому параметр N (см. уравнение (2.7) в [1]) также имеет предельные значения. Однако чем больше N для струйных и дроссельных электрогидравлических (электропневматических) ЭГД-преобразователей, тем эффективнее ЭГД-управление. Например, отклонение x на выходе из однородного электрического поля, предварительно заряженного в резко неоднородном поле элемента незатопленной струи (или капли жидкости) с объемным зарядом ρ_e , прямо пропорционально N :

$$x = Nl^2/(2h), \quad (1.1)$$

где l и h — длина отклоняющих пластин и расстояние между ними соответственно. В выражении для N $l_0 = h$; E — напряженность однородного электрического поля между отклоняющими электродами. Поэтому

$$N = \rho_e E h / (\rho v^2) = \rho_e U / (\rho v^2).$$

Диапазон N (как и безразмерных параметров G , Re_ε , Pe_ε (см. формулы (2.7), (2.9)–(2.11) в [1]) для конкретных типов преобразователей [2–5] зависит от электрофизических параметров рабочих сред (ε , b , D) в указанных в [1] пределах их изменений,

выбранного характерного линейного размера l_0 и рабочего диапазона E_0 между электродами (типа игла — плоскость, коаксиальными, плоскими и др.). Например, при управлении потоками рабочей жидкости ($2 \leq \varepsilon < 3$) и сообщении им в резко неоднородном поле объемного электрического заряда $\rho_e = 10^{-1} \div 10^{-2}$ Кл/м³ получим $0 < E_0 < (10^7 \div 10^8)$ В/м. При отклонении заряженных незатопленных струй или капель в однородном электрическом поле $0 < E_0 < 10^6$ В/м, причем максимальная объемная плотность заряда в капле $\rho_{e \max}^k$ ограничена и находится из критерия устойчивости Рэлея для заряженной сферической капли [2]

$$\rho_{e \max}^k \leq 16,97 \sqrt{\varepsilon_0 \alpha / d_k^3},$$

где d_k — диаметр капли, который, как правило, лежит в пределах $(30 \div 300) \cdot 10^{-6}$ м; α — коэффициент поверхностного натяжения рабочей жидкости.

Однако во всех случаях напряженность E_0 должна быть меньше напряженности пробоя $E_{\text{пр}}$ всего межэлектродного промежутка. При управлении потоками газа максимальное значение E_0 уменьшается на порядок и более, предельная объемная плотность зарядов ρ_e также уменьшается на один-два порядка.

При ЭГД-изменении режимов течения струй и потоков, изменении профиля скоростей, в ЭГД-расходомерах с использованием в качестве информативного параметра одной из составляющих полного тока (формулы (2.5), (2.11) в [1]) число Рейнольдса Re не превышает 2300. Однако в других приложениях, например в меточных ЭГД-расходомерах [5], ионная метка вносится в развитый турбулентный поток рабочей жидкости или газа с $Re \gg 2300$ (с целью увеличения точности преобразования сигналов). В этом случае параметр ЭГД-взаимодействия N в момент создания ионной метки должен быть по возможности мал, для того чтобы не оказывать ЭГД-воздействия на профиль скоростей потока и не вносить дополнительной погрешности при измерении расхода жидкости или газа.

Нормальная работа ЭГД-преобразователей с отклонением заряженной струи эффективна, когда приобретенная в поперечном электрическом поле отклоняющих электродов скорость ионов значительно меньше средней скорости струи:

$$bE \ll v_0, \quad (1.2)$$

а постоянная времени уменьшения объемного заряда в элементарном объеме жидкости по длине струи существенно больше времени его нахождения в поле отклоняющих электродов:

$$\varepsilon_0 \varepsilon / \sigma \gg l / v_0. \quad (1.3)$$

В (1.2), (1.3) v_0 — средняя скорость струи между отклоняющими электродами длиной l .

Условие (1.2) для указанных выше пределов изменения v_0 и напряженности отклоняющего электрического поля не выполняется при управлении заряженными затопленными струями газа (воздуха) вследствие высокой подвижности ионов в газе ($b \sim 10^{-4}$ м²/(В·с)), и в этом случае ЭГД-управление реализовать практически невозможно.

В рабочих диэлектрических жидкостях типа минеральных масел подвижность ионов на четыре порядка ниже, чем в воздухе, и на основании (1.2) скорость струи жидкости в поле отклоняющих электродов должна быть $v_0 \gg (10^{-1} \div 10^{-2})$ м/с, что достижимо при выполнении условия (3.1) из работы [1]. Кроме того, обеспечивается выполнение (1.3), поскольку удельная проводимость σ рабочих жидких сред низка (порядка $10^{-14} \div 10^{-11}$ 1/(Ом·м)).

Хотя ЭГД-управление заряженными затопленными струями газа в соответствии с (1.2) реализовать не удастся, использование ЭГД-компрессоров [3, 4], в которых управляющие давление и расход газа создаются униполярным потоком ионов во внешней зоне

коронного разряда, позволяет управлять отклонением незаряженных затопленных струй газа (воздуха). В свою очередь, при приложении к ламинарному потоку газа продольного неоднородного поля, совпадающего с направлением течения газа, и создании в нем униполярного объемного заряда можно изменять профиль скоростей потока, тем самым изменяя гидравлическое сопротивление участка напорного трубопровода. Поскольку коэффициент диффузии ионов в газах ($D \approx 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$) на пять порядков больше, чем в рабочих диэлектрических жидкостях ($D \approx 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$), в общем случае при дроссельном ЭГД-преобразовании электрического сигнала в пневматический с продольным управляющим электрическим полем диффузия способствует неравномерному распределению зарядов по сечению трубопровода и влияет на изменение профиля скоростей и расхода газа через данный участок напорного трубопровода. Это влияние можно оценить, используя систему безразмерных уравнений (2.7)–(2.12) из работы [1], записанную в цилиндрических координатах для установившегося заряженного ламинарного течения газа в диэлектрической трубе диаметром $d = 2R$ с продольным электрическим полем. При выводе этих уравнений пренебрегалось силами тяжести, так как при большой подвижности ионов в газе электрическое число Рейнольдса $\text{Re}_э \ll 1$ [3]. Тогда, например, для безразмерного расхода газа через данный участок трубопровода при изменении профиля скоростей потока в электрическом поле получим

$$Q' = \frac{2N\text{Re}G}{\text{Pe}_э} \left[\left(1 + \frac{8G}{\text{Pe}_э}\right) \ln \frac{1 + 8G/\text{Pe}_э}{8G/\text{Pe}_э} - 1 \right] - \frac{\text{Re}Eu \delta p'}{8 \delta z'}. \quad (1.4)$$

Здесь $Q' = Q/(\pi R^2 v_0)$; $p' = p/p_0$ — безразмерный перепад давления на участке трубопровода $z' = z/R$; Q, p — текущие расход и перепад давления; p_0 — давление питания от насоса. В качестве характерного линейного размера в выражениях для параметра N , электрического числа Пекле $\text{Pe}_э$ и числа G выбран радиус R трубопровода, а в выражении для числа Рейнольдса Re — диаметр d трубопровода. Как следует из (1.4), чем больше параметр ЭГД-взаимодействия N , тем больше изменение расхода газа под действием продольного электрического поля.

Аналогично можно показать, что в вихревых ЭГД-преобразователях, расчетная модель которых может быть представлена в первом приближении коаксиальными цилиндрическими электродами, входные сигналы (изменение расхода или давления) также увеличиваются с увеличением N .

Ограниченная мощность сигнала на выходе электрогидравлических (электропневматических) ЭГД-преобразователей при их использовании в электрогидравлических (электропневматических) системах управления приводит к необходимости применения соответствующих гидравлических (пневматических) усилителей мощности, для того чтобы управлять мощными исполнительными механизмами. Безусловным преимуществом ЭГД-управления каплями рабочих жидкостей в электрокаплеструйных устройствах является то, что сама капля и ее отклонение в поле в соответствии с (1.1) выполняют функции исполнительного механизма, поэтому отсутствует необходимость в дополнительных усилителях мощности и сложных исполнительных механизмах. Этим объясняется широкое применение электрокаплеструйных технологий в различных отраслях: машиностроении, легкой и пищевой промышленности, судостроении, медицине и др.

2. Входным сигналом ЭГД-устройств часто является унифицированный сигнал $0 \div 5 \text{ В}$ с выходов управляющих микроЭВМ или соответствующих датчиков. Поэтому в структуре ЭГД-преобразователей необходим высоковольтный усилитель, на вход которого поступают унифицированные управляющие электрические сигналы, а выход подключен непосредственно к электродам преобразователей.

Сформулируем требования к высоковольтным усилителям в схемах ЭГД-насосов и ЭГД-компрессоров с однофазным диэлектриком и расходной нагрузкой. В данных преоб-

разователях электроды, размещенные в жидкости или газе, представляют собой конструкцию типа игла — трубка. При приложении напряжения к электродам возникает униполярный поток ионов, знак которых совпадает со знаком потенциала острия, определяющий ток I между электродами. Передавая количество своего движения окружающей рабочей среде, ионы вызывают движение жидкости или газа со скоростью v и на выходе трубки создают давление p_1 . Тогда для одномерного случая с учетом (2.1)–(2.6) из работы [1] при пренебрежении токами диффузии, поверхностными зарядами на стенках трубопровода и потерями давления на трение и турбулентность в соответствии с [6] можно получить

$$\left. \frac{dp_1}{dv} \right|_{I=\text{const}} = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0 E(E - E_k)}{bE + v}; \quad (2.1)$$

$$\left. \frac{dp_1}{dv} \right|_{U=\text{const}} = \frac{E(E - E_k)^2}{2bE^2 + 4bEE_k + 8Ev + 4E_kv + 6v^2/b}. \quad (2.2)$$

Анализ выражения (2.1) при $bE + v > 0$ показывает, что увеличение скорости v , вызванное гидравлической (пневматической) нагрузкой, при поддержании постоянного по амплитуде тока приводит к уменьшению давления p_1 и как следствие к уменьшению скорости v , и наоборот. Это эквивалентно отрицательной обратной связи, поэтому в данном случае ЭГД-преобразователь (ЭГД-насос или ЭГД-компрессор) является стабильным источником расхода.

При поддержании постоянного по амплитуде напряжения в каждой рабочей точке ЭГД-насоса или ЭГД-компрессора такая идеальная система при принятых допущениях в соответствии с (2.2) является неустойчивой по отношению к флуктуациям скорости. В реальных системах гидро- или газодинамические потери в каналах выступают в качестве демпфирующего фактора данной неустойчивости и при поддержании постоянного по амплитуде напряжения в каждой рабочей точке давление может асимптотически меняться с изменением v до какого-либо фиксированного значения, определяемого параметрами системы.

На основании изложенного выше можно сформулировать следующее требование, предъявляемое при проектировании электрической части ЭГД-преобразователей. При работе ЭГД-насосов и ЭГД-компрессоров на расходную нагрузку, а также в схемах аналогового преобразования электрических сигналов в гидравлические или пневматические целесообразно в качестве электрического сигнала на электродах использовать изменение напряжения U , однако в каждой рабочей точке электрическая схема должна обеспечить поддержание постоянного по амплитуде тока между электродами таких преобразователей.

Если ЭГД-преобразователи используются для дискретного преобразования электрических сигналов в гидравлические или пневматические, то допустимый в гидропневмоавтоматике разброс уровня сигналов, соответствующих логическим “нулю” и “единице”, как правило, существенно больше интервала, в котором меняется выходной сигнал в ЭГД-устройствах за счет изменения тока между электродами. В этом случае целесообразно использовать более простые нестабилизированные по выходному току высоковольтные усилители, работающие в дискретном режиме.

3. Сформулируем основные требования к отдельным параметрам ЭГД-преобразователей, принцип действия которых основан на использовании физических процессов, происходящих при коронном разряде в газе.

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 α_e , определяемым произведением среднего числа столкновений на единице

длины на вероятность ионизации электронным ударом при столкновении. При этом должно выполняться условие $w_e > w_{и}$, где $w_{и}$ — энергия ионизации рабочих газов, w_e — энергия электронов.

В электроотрицательных газах и их смесях, например в воздухе, атомы и молекулы могут присоединять лишний электрон, образуя устойчивый отрицательный ион. Поэтому

$$\alpha_{ef} = \alpha_e - \alpha_{п}, \quad (3.1)$$

где α_{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 ЭГД-преобразователях с использованием коронного разряда в электроотрицательных газах (воздухе) нормальный режим функционирования, связанный с обеспечением условия ударной ионизации, определяется соотношением

$$E/p \geq c, \quad (3.2)$$

где c — постоянная величина для выбранного рабочего газа. Для воздуха $c = 23,8 \div 26,3$ В/(м·Па) [7, 8].

При радиусах закругления игольчатых электродов порядка 10^{-5} м напряженность электрического поля в коронирующем слое составляет примерно $(3 \div 5) \cdot 10^7$ В/м. Поэтому из (3.2) следует, что диапазон давления, в котором могут работать электрогазодинамические преобразователи, более чем в два раза превышает рабочий диапазон питания устройств пневмоавтоматики, обычно составляющий 0,6 МПа и реже 1 МПа.

Определим условия, обеспечивающие применимость метода ЭГД-управления потоками газа при изменении его температуры. Эффективный коэффициент ударной ионизации (3.1) 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 [3, 9]

$$\alpha_{ef} = \frac{aT_0}{\rho_0 p_0 T} \left(E - c \frac{\rho_0 p_0 T}{T_0} \right)^2, \quad (3.3)$$

где коэффициент a совместно с показателем степени определяет скорость возрастания α_{ef}/p при увеличении E/p после порогового значения; ρ_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 (3.3) получаем условие применения ЭГД-управления при изменении температуры рабочего газа преобразователей (температуры окружающей среды)

$$\frac{ET_0}{\rho_0 p_0 T} \geq c. \quad (3.4)$$

Из (3.2) и (3.4) следует, что метод ЭГД-преобразования вида энергии сигналов применим в широком диапазоне давления и температуры окружающей среды и рабочего газа. Например, для преобразователей, работающих на воздухе, при $E \approx 10^7$ В/м, $T_0 = 293$ К, $\rho_0 = 1$, $p_0 = 101,3$ кПа, $c = 23,8$ В/(м·Па) из (3.4) заключаем, что температура воздуха может меняться до нескольких тысяч градусов Кельвина. При этом необходимо учитывать термоавтоэлектронную эмиссию [8]. Однако ЭГД-преобразователи, как и традиционные, требуют применения известных методов компенсации неблагоприятного влияния на их характеристики температуры окружающей среды.

Для получения не только динамических (импульсных), но и потенциальных сигналов на выходе ЭГД-преобразователей без их усложнения прежде всего необходимо обеспечить

поток униполярных ионов в течение времени существования электрических сигналов на их входе. 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 [3, 7, 9]

$$\int_0^{l_k} \alpha_{ef} dx = K \simeq \text{const}, \quad (3.5)$$

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 (3.5) при различных знаках коронирующего электрода могут отличаться в 2–3 раза [8]: для положительного потенциала (положительная корона) $K \approx 18 \div 20$, в то время как для отрицательной короны $K = \ln[(1 + \gamma)/\gamma] = 8 \div 9,2$. Здесь γ — 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 (3.5) в ЭГД-преобразователях возникает устойчивый коронный разряд, 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.

Существенные различия значений K в (3.5) при различной полярности коронирующего электрода незначительно влияют на E_k и U_k [8] вследствие сильной зависимости α_{ef} от напряженности поля E (см., например, (3.3)). Поэтому даже небольшое изменение $E(x)$ приводит к существенным изменениям интеграла в левой части выражения (3.5). Как следует из экспериментов, значения E_k для отрицательной и положительной корон в воздухе различаются незначительно; для отрицательной короны величина E_k несколько меньше, чем для положительной.

Определение E_k и U_k имеет большое значение при анализе статических и динамических характеристик ЭГД-преобразователей. В настоящее время существует большое количество полуэмпирических формул для E_k и U_k , которые сильно отличаются друг от друга, так как E_k определяются по-разному [3]. Они применимы при больших межэлектродных промежутках, когда внутренняя область короны, где $\alpha_{ef} > 0$, во много раз меньше межэлектродной зоны и поле на большей части межэлектродного промежутка можно считать квазиоднородным, например в линиях высоковольтных передач. Однако в ЭГД-преобразователях расстояния между коронирующими электродами невелики и составляют несколько миллиметров при выполнении условия (3.5). Размер внутренней зоны короны становится соизмеримым с межэлектродным расстоянием, и практически на всем межэлектродном промежутке имеет место неоднородное электрическое поле с резким увеличением напряженности непосредственно у электрода с малым радиусом кривизны. В большинстве случаев это делает использование известных формул для начальных напряженностей поля неприемлемым при расчете характеристик электропневматических (пневмоэлектрических) ЭГД-преобразователей. Ниже для E_k и U_k получены выражения с учетом конструктивных особенностей преобразователей.

На основании проведенных исследований для инженерных приложений автором получена полуэмпирическая формула для E_k , дающая хорошее соответствие экспериментальным данным, которая учитывает зависимость E_k от расстояния h между электродами

типа игла — плоскость при малых межэлектродных промежутках:

$$E_k = A\rho_0 + B\sqrt{h\rho_0/r_0}, \quad (3.6)$$

где $A = c\rho_0 T/T_0$; $B = \sqrt{K\rho_0 T/(adT_0)}$; коэффициенты a , c находятся из (3.3); K определяется из условия (3.5) 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 E имеет ярко выраженную неоднородность по длине межэлектродного промежутка.

В случае коаксиальных электродов соотношение (3.6) можно записать в виде

$$E_k = A\rho_0 + B\sqrt{(R/r_0 - 1)\rho_0}, \quad (3.7)$$

где R — радиус закругления некоронирующего электрода. Например, для $R = 5$ мм в диапазоне радиуса коронирующего электрода $r_0 = (0,5 \div 9,0) \cdot 10^{-2}$ мм в выражении (3.7) для воздуха коэффициенты $A = 34,2$ кВ/см, $B = 11,799$ кВ/см.

В формуле (3.7) в отличие от известных аналогичных для E_k формул [7–9] учитывается зависимость E_k от расстояния между электродами. Расчеты E_k по выражению (3.7) для указанного выше диапазона r_0 хорошо соответствуют экспериментальным данным как для отрицательной, так и для положительной короны, тогда как результаты расчетов по известным полуэмпирическим формулам Пика, Таунсенда, Леша, Разевига, Энгеля, Штенбека и др., не учитывающим зависимости E_k от расстояния между электродами при таких малых межэлектродных промежутках, сильно отличаются от экспериментальных данных.

Величина начального напряжения короны U_k определяется из (3.7) по формуле

$$U_k = E_k r_0 \ln(R/r_0). \quad (3.8)$$

Рабочий диапазон изменения напряжения на электродах ЭГД-преобразователей, основанных на использовании явлений коронного разряда, изменяется в пределах

$$U_k \leq U < U_{\text{пр}}, \quad (3.9)$$

где $U_{\text{пр}}$ — напряжение, при котором происходит искровой пробой межэлектродного промежутка.

Следовательно, нижний предел рабочего диапазона напряжения U_k на электродах электрогазодинамических преобразователей определяется процессами, происходящими во внутренней области короны (в коронирующем слое). В свою очередь, внешняя область коронного разряда определяет ЭГД-эффект, поскольку именно здесь образуется униполярный (знака коронирующего острия) объемный электрический заряд. Верхний предел рабочего диапазона напряжения $U_{\text{пр}}$ характеризуется условиями, при которых происходит искровой пробой внешней области короны. Для смягчения требований к электрической части преобразователей диапазон напряжений (3.9) желательно выбирать максимально возможным. Оптимальным считается такой ЭГД-преобразователь, в котором конструктивные и другие параметры обеспечивают минимальное напряжение возникновения короны U_k и максимальное напряжение искрового пробоя $U_{\text{пр}}$.

Расширить возможный диапазон напряжения на электродах электропневматических и пневмоэлектрических ЭГД-преобразователей можно прежде всего за счет схемных решений при соответствующем выборе полярности коронирующего электрода.

Существенное различие значений правой части выражения (3.5) для положительной и отрицательной корон на величину E_k влияет незначительно [8]. Для отрицательной короны эта величина будет меньше, чем для положительной [8]. Соответственно значение U_k для отрицательной короны будет меньше, чем для положительной.

Поскольку при положительном потенциале игольчатого электрода ширина зоны высоких напряженностей поля больше [3], 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 $U_{пр}$ на электродах, чем при отрицательной короне. С учетом того, что напряжения возникновения положительной и отрицательной короны U_k в первом приближении одинаковы, можно сделать заключение о более узком рабочем диапазоне напряжения положительной короны.

При обтекании острия потоками газа часть пространственного заряда, образовавшегося во внутренней области короны, сдувается от острия, его влияние на результирующее поле уменьшается и условия формирования стримеров изменяются. Поэтому с увеличением скорости обтекания коронирующего электрода рабочим газом повышается и пробивное напряжение $U_{пр}$. Начальное напряжение короны U_k практически не зависит от скорости потока, что увеличивает диапазон напряжения на электродах электрогазодинамических преобразователей.

Выбором конструктивных параметров ЭГД-преобразователей (прежде всего радиуса закругления r_0 игольчатого электрода) можно существенно менять рабочий диапазон напряжений (см., например, (3.6)–(3.9)), а также величину униполярного заряда, вносимого в рабочий поток газа (жидкости). Последнее следует, например, из формулы (3.4) в [1], поскольку величина r_k прежде всего определяется r_0 (см. формулу (3.5) в [1]).

С уменьшением расстояния h между электродами величина $U_{пр}$ уменьшается быстрее, чем U_k , что приводит к уменьшению рабочего диапазона $U_k \leq U < U_{пр}$. Поэтому при дальнейшем уменьшении h , начиная с некоторого критического расстояния h_0 между электродами, корона не появляется, а сразу происходит искровой пробой, т. е. рабочий диапазон напряжения U равен нулю. Следовательно, в ЭГД-преобразователях отношение h/r_0 должно быть больше определенной величины: $h/r_0 > h_0$. Например, для коаксиальных электродов соотношение радиусов, при которых образуется коронный разряд в воздухе, должно удовлетворять условию [3, 7] $R/r_0 = (h + r_0)/r_0 > 2,718$.

При увеличении давления p газа диапазон рабочего напряжения $U_k \leq U < U_{пр}$ на электродах пневмоэлектрических ЭГД-преобразователей при выбранных геометрических размерах межэлектродного промежутка увеличивается. Это объясняется тем, что с увеличением p величина $U_{пр}$ увеличивается быстрее, чем U_k .

Физические процессы, характерные для выбранного способа преобразования вида энергии сигналов, принципиально не ограничивают необходимое быстродействие электрогазодинамических преобразователей, поскольку верхняя граница частоты изменения напряжения на электродах, при которой еще обеспечивается устойчивый коронный разряд, на несколько порядков больше полосы пропускания частот устройств пневмоавтоматики. Только при очень высоких скоростях увеличения входного напряжения (сотни киловольт в микросекунду [3]), которых не бывает в ЭГД-преобразователях, возможно возникновение стримеров при достижении напряжения U_k .

Динамика возникновения коронного разряда в ЭГД-преобразователях, как и в ряде других устройств (например, в высоковольтных аппаратах [7]), определяется статистическим временем запаздывания разряда t_c при достижении U_k (характеризующего момент появления свободного электрона, способного начать ударную ионизацию) и временем t_ϕ формирования коронного разряда. В электрогазодинамических преобразователях с малыми расстояниями между электродами, как правило, $t_\phi \ll t_c$, и время возникновения коронного разряда $t_p = t_c + t_\phi \approx t_c$. При этом t_p не превышает нескольких микросекунд, тогда как в лучших пневмоавтоматических устройствах время срабатывания порядка миллисе-

кунд, поэтому при анализе динамики ЭГД-преобразователей им можно пренебречь.

4. Процессы сообщения зарядов жидкому диэлектрику в сильных электрических полях исследованы менее детально, чем процессы сообщения зарядов газам. В настоящее время общепринятая теория ионизации жидкости отсутствует [3], что обусловлено многообразием явлений, имеющих место при протекании электрического тока в диэлектрической жидкости.

Проведенные исследования показали, что в резко неоднородных полях (как и в случае короны в воздухе) заряд в диэлектрической жидкости на большей части межэлектродного промежутка является униполярным и его знак совпадает со знаком потенциала острого электрода. Более того, униполярная проводимость в жидкости возникает также при достижении определенного значения напряжения на электродах типа игла — плоскость аналогично тому, как это происходит при коронном разряде в газах при достижении начального напряжения короны U_k . В этом смысле механизм ЭГД-воздействия на поток диэлектрической жидкости подобен механизму воздействия при коронном разряде в газах, хотя физика образования объемного униполярного заряда в каждом случае различна.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Нагорный В. С.** Электрогазо- и электрогидродинамическое управление струями и потоками газа и жидкости. 1. Физико-математические основы // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 2. С. 25–31.
2. **Нагорный В. С.** Электрокаплетруйные регистрирующие устройства. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988.
3. **Денисов А. А., Нагорный В. С.** Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматики. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979.
4. **Нагорный В. С., Денисов А. А.** Устройства автоматики гидро- и пневмосистем. М.: Высш. шк., 1991.
5. **Денисов А. А., Нагорный В. С., Телемтаев М. М., Воеводин В. П.** АСУ процессами дозирования / Под общ. ред. В. С. Нагорного. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1985.
6. **Steutzer O. M.** Instability of certain electrohydrodynamic system // Phys. Fluids. 1959. V. 2, N 6. P. 642–648.
7. **Дмоховская Л. Ф., Ларионов В. П., Пингаль Ю. С. и др.** Техника высоких напряжений / Под общ. ред. Д. В. Разевига. М.: Энергия, 1976.
8. **Райзер Ю. П.** Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
9. **Капцов Н. А.** Электрические явления в газах и вакууме. М.: Гостехтеоретиздат, 1950.

*Поступила в редакцию 25/II 1998 г.,
в окончательном варианте — 15/III 1999 г.*