

УДК 538.3:532:538.4

## ЭЛЕКТРОГАЗО- И ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ СТРУЯМИ И ПОТОКАМИ ГАЗА И ЖИДКОСТИ

### 1. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В. С. Нагорный

Санкт-Петербургский государственный технический университет, 195251 Санкт-Петербург

Рассмотрены физические и математические основы метода электрогазо- и электрогидродинамического преобразования электрических сигналов в пневматические (гидравлические) сигналы и наоборот при управлении струями и потоками газа и жидкости в электропневмогидравлических системах.

1. Для электрогазо- и электрогидродинамического (ЭГД) управления струями и потоками жидкости или газа используются объемные кулоновские или поляризационные силы, создаваемые на молекулярном уровне приложением сильных электрических полей к рабочим средам преобразователей, а также сопутствующие им явления. Это позволяет устранить все подвижные механические и электромеханические элементы из процесса преобразования сигналов при решении задач связи, управления, регистрации и измерения в электрогидропневматических системах [1–4] и как следствие увеличить их быстродействие и надежность. Этим разработанные электропневматические (электрогидравлические) и пневмоэлектрические (гидроэлектрические) ЭГД-преобразователи (интерес к которым непрерывно возрастает во всех технически развитых странах) отличаются от традиционно применяемых аналогичных по назначению устройств.

В струйных электрогидравлических (электропневматических) ЭГД-преобразователях осуществляется преобразование энергии струи жидкости или газа в давление или расход, являющиеся выходными гидравлическими (пневматическими) сигналами преобразователей, путем изменения режима течения (турбулизации ламинарной струи потоком ионов, создаваемым в резко неоднородном электрическом поле), отклонения струи в электрическом поле, ЭГД-управлением встречно соударяющимися струями и изменением профиля скоростей струи [2–4]. Например, в струйных электрогидравлических ЭГД-преобразователях сформированная компактная струя жидкости, проходя между электродами, на которые подается усиленное высоковольтным усилителем управляющее напряжение, например с выхода микроЭВМ, отклоняется относительно приемных сопел под действием результирующей пондеромоторной силы. В зависимости от величины отклонения струи в приемных соплах изменяется давление (или расход) рабочей жидкости, которое после усиления гидравлическим усилителем мощности управляет соответствующим гидравлическим исполнительным механизмом. В свою очередь, характер используемых пондеромоторных сил (поляризационных или кулоновских) определяет принцип действия, характеристики и конструктивное исполнение преобразователей.

В электрокаплеструйных устройствах и разработанных на их основе электрокаплеструйных технологиях формируют линейный поток монодисперсных капель одинакового размера (до ста тысяч капель в секунду) [1], каждой из которых индукционным или ионным методом можно сообщать электрический заряд в соответствии с управляющей

программой. Далее в отклоняющем поле управляют такой заряженной каплей рабочей жидкости. В этом случае выходным сигналом является собственно отклонение капли в электрическом поле, которую направляют в нужную точку поверхности соответствующего объекта любой формы и физической природы. Таким образом легко реализуются знако-синтезирование, графопостроение, передача полутонов, получение цветных изображений (наложением капель жидкости желтого, пурпурно-красного и голубого цветов).

При управлении потоками в так называемых дроссельных электрогидравлических и электропневматических ЭГД-преобразователях [2–4] в их конструкции отсутствует открытый участок трубопровода, что позволяет применять их на объектах, подверженных большим вибрациям и ускорениям. Принцип их действия основан на изменении гидравлического сопротивления протеканию потока диэлектрической жидкости (газа) на участке напорного трубопровода при приложении к нему продольного или поперечного электрического поля. При этом перепад давления на фиксированной длине трубопровода может определяться как микро-, так и макропроцессами, происходящими в потоке жидкости под действием электрического поля. Показано, что микропроцессы (изменение коэффициента вязкости и ориентирующее действие поля на дипольные молекулы) оказывают пренебрежимо малое влияние на потери напора при протекании по трубопроводам технически чистых жидкостей гидросистем [2], хотя в специально созданных реологических жидкостях влияние электрического поля на их вязкость может оказаться существенным.

Для электрогидравлических систем управления с технически чистыми рабочими диэлектрическими жидкостями разработаны ЭГД-преобразователи с изменением профиля скоростей ламинарного потока под действием продольного электрического поля, изменением вихреобразований в потоке, турбулизацией ламинарного потока в поперечном электрическом поле, а также с изменением характеристик предварительно закрученного потока (так называемые вихревые ЭГД-преобразователи [2, 3]).

При ЭГД-преобразовании параметров потоков в электрические сигналы входным сигналом является расход или давление рабочих жидкостей и газов, а выходным — одна из составляющих полного тока с последующим ее усилением малошумящим помехозащищенным электронным усилителем с большим коэффициентом усиления. В данных преобразователях расхода уменьшают (например, с помощью дифференциальных схем включения выявительных электродов) влияние температуры и давления на их характеристики, поскольку коэффициенты подвижности и диффузии ионов в рабочих средах зависят от этих параметров. В меточных ЭГД-преобразователях расхода [4] в турбулентном потоке газа или диэлектрической жидкости с практически равномерным полем скоростей на большей части сечения потока создают пространственно ограниченные концентрации униполярных ионов (ионные метки), скорость перемещения которых с потоком характеризует объемный расход. В качестве информативного параметра объемного расхода при постоянном сечении трубопровода принимается время прохождения ионной меткой базового участка с металлическими выявительными электродами, в которых электрический ток наводится движущейся с потоком ионной меткой. Для увеличения точности преобразования сигналов выявительные электроды размещены так, что реализуется дифференцирующая цепочка и в вычислительное устройство поступает электрический сигнал, соответствующий экстремуму наводимого меткой импульса на выявительном электроде. Таким образом фиксируется прохождение «электрического центра тяжести» ионной метки в контрольных сечениях потока. При этом как бы ни расплывалась метка под действием турбулентной диффузии и электрического поля, ее «центр тяжести» будет двигаться в потоке со средней его скоростью. Базовый участок между выявительными электродами выбирается с учетом значения среднеквадратичного отклонения времени прохождения меткой базового участка, характеризующего пульсации величины этого времени при турбулентном течении потока. Использо-

зование алгоритмов цифровой фильтрации превращает такой меточный ЭГД-расходомер в счетчик количества газа или жидкости. Характеристики меточных ЭГД-преобразователей вычисляются на основе разработанной математической модели процессов, происходящих в меточном расходомере или счетчике, с учетом межзонного взаимодействия в метке [4].

2. При ЭГД-управлении используются сильные электрические поля с максимальной напряженностью  $E_0$  до  $10^7$  В/м (например, в резко неоднородных полях) и напряжением на электродах преобразователей порядка  $10^4$  В. Характерной чертой ЭГД-преобразователей является ограничение напряженности  $E_0$  (и соответственно напряжения  $U$  на электродах) напряженностью  $E_{пр}$  (напряжением  $U_{пр}$ ) искрового пробоя межэлектродного промежутка. Искровой пробой не является рабочим режимом ЭГД-преобразователей, поэтому в них всегда выполняется условие  $E_0 < E_{пр}$  и соответственно  $U < U_{пр}$ . В электрические схемы преобразователей целесообразно вводить соответствующее блокирующее устройство, исключающее искровой пробой [4].

Управляющий сигнал может поступать с выхода микроЭВМ, поэтому с позиций обеспечения внутренней безопасности схем и простоты реализации электронных управляющих устройств (высоковольтных усилителей) в качестве рабочих сред ЭГД-преобразователей выбирают слабопроводящие диэлектрические жидкости и газы (минеральные масла: трансформаторное, веретенное, индустриальное и т. п.), а в качестве рабочего газа — воздух. В этом случае токи в межэлектродном промежутке не превышают нескольких микроампер (для жидкостей) и десятков микроампер (для газов), а выходная мощность высоковольтных усилителей не превышает 1 Вт. При таких малых токах магнитными полями можно пренебречь, а при небольших скоростях течений рабочих сред преобразователей не только жидкости, но и газы будем считать практически несжимаемыми. При ЭГД-управлении струями или потоками в рабочих жидкостях или газах, как правило, в поле создается объемный электрический заряд, который также создает электрическое поле, поэтому в математических моделях используется уравнение Пуассона.

В случае униполярной проводимости, изотермических процессов в несжимаемой жидкости, пренебрегая токами смещения, систему ЭГД-уравнений можно записать в дифференциальной форме

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = \frac{F_0}{\rho} - \frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{\rho_e \mathbf{E}}{\rho} - \frac{0,5 \varepsilon_0 \nabla \varepsilon E^2}{\rho} + 0,5 \varepsilon_0 \nabla \left[ E^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \rho \right]; \quad (2.1)$$

$$\nabla \mathbf{v} = 0; \quad (2.2)$$

$$\nabla \mathbf{E} = \rho_e / (\varepsilon_0 \varepsilon); \quad (2.3)$$

$$\nabla \mathbf{j} + \frac{\partial \rho_e}{\partial t} = 0; \quad (2.4)$$

$$\mathbf{j} = \rho_e b \mathbf{E} + \rho_e \mathbf{v} - D \nabla \rho_e; \quad (2.5)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0. \quad (2.6)$$

Здесь  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{j}$  — векторы скорости потока, напряженности электрического поля, плотности тока соответственно;  $F_0$  — объемная плотность сил тяжести, центробежных сил и т. п.;  $p$ ,  $\rho$ ,  $\nu$ ,  $\varepsilon$  — давление, плотность, коэффициент кинематической вязкости и относительная диэлектрическая проницаемость жидкости (газа) соответственно;  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная;  $\rho_e$  — объемная плотность электрического заряда;  $b$ ,  $D$  — коэффициенты подвижности и диффузии ионов в жидкости (газе) соответственно;  $t$  — время.

Данная система уравнений является замкнутой и позволяет решать любые задачи, связанные с взаимодействием течения диэлектрических сред и электрического поля. В ряде случаев можно пренебречь объемными электрическими силами, обусловленными неод-

нородностью диэлектрической проницаемости и электрострикцией. При этом уравнения (2.1)–(2.6) удобно переписать в безразмерном виде

$$\text{Sr} \frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t'} + (\mathbf{v}' \nabla') \mathbf{v}' = \frac{F'_0}{\text{Fr}} - \text{Eu} \nabla' p' + \frac{\nabla'^2 \mathbf{v}'}{\text{Re}} + N \rho'_e \mathbf{E}'; \quad (2.7)$$

$$\nabla' \mathbf{v}' = 0; \quad (2.8)$$

$$G \nabla' \mathbf{E}' = \rho'_e; \quad (2.9)$$

$$\text{Sr}_3 \frac{\partial \rho'_e}{\partial t'} + \nabla' \mathbf{j}' = 0; \quad (2.10)$$

$$Z \mathbf{j}' = \rho'_e (\mathbf{E}' + \text{Re}_3 \mathbf{v}') - \frac{\nabla' \rho'_e}{\text{Pe}_3}; \quad (2.11)$$

$$\nabla' \times \mathbf{E}' = 0. \quad (2.12)$$

В системе уравнений (2.7)–(2.12) использованы следующие безразмерные параметры:  $\text{Sr} = l_0/(t_0 v_0)$  — число Струхалия;  $\text{Eu} = p_0/(\rho v_0^2)$  — число Эйлера;  $\text{Re} = v_0 l_0/\nu$  — число Рейнольдса;  $\text{Fr} = v_0/(g l_0)$  — число Фруда;  $g$  — ускорение свободного падения;  $N = \rho_{e0} E_0 l_0/(\rho v_0^2)$  — параметр ЭГД-взаимодействия, представляющий собой отношение объемной плотности электрической энергии к объемной плотности гидро- или газодинамической энергии;  $G = \varepsilon_0 \varepsilon E_0/(l_0 \rho_{e0})$  — число, характеризующее соотношение между наложенным внешним электрическим полем и собственным полем заряда;  $Z = j_0/(b \rho_{e0} E_0)$  — относительная плотность тока проводимости;  $\text{Re}_3 = v_0/(b E_0)$  — электрическое число Рейнольдса, характеризующее зависимость между конвективным током и током проводимости;  $\text{Pe}_3 = b E_0 l_0/D$  — электрическое число Пекле, характеризующее соотношение скорости движения зарядов в электрическом поле и скорости их диффузного дрейфа;  $\text{Sr}_3 = \rho_{e0} l_0/(j_0 t_0)$  — электрическое число Струхалия, характеризующее соотношение плотности токов в стационарном и переходном режимах;  $v_0, p_0, E_0, j_0, \rho_{e0}, t_0, l_0$  — скалярные характерные масштабы, причем  $\mathbf{v} = v_0 \mathbf{v}'$ ,  $p = p_0 p'$ ,  $\mathbf{E} = E_0 \mathbf{E}'$ ,  $\mathbf{j} = j_0 \mathbf{j}'$ ,  $\rho_e = \rho_{e0} \rho'_e$ ,  $t = t_0 t'$ ,  $l = l_0 l'$ . Безразмерные операторы принимают вид  $\nabla' = \nabla/l_0$ ,  $\nabla'^2 = \nabla^2/l_0^2$ .

При анализе конкретных типов преобразователей отношение управляющего внешнего электрического поля к собственному полю заряда учитывается выбором числа  $G$  в безразмерном уравнении Пуассона (2.9). Для струй и потоков газов, в которых создаваемая при ЭГД-управлении объемная плотность  $\rho_e$  электрических зарядов на несколько порядков меньше, чем в рабочих диэлектрических жидкостях ( $\varepsilon$  также в 2–3 раза меньше), в ряде случаев в первом приближении можно пренебречь влиянием собственного поля зарядов на характеристики преобразователей. Однако при повышении требований к точности преобразования сигналов (например, в меточных ЭГД-преобразователях расхода газа) в электрический сигнал в уравнении переноса ионной метки учитывается межюнное взаимодействие в метке [4].

Использование в качестве рабочих сред маловязких непроводящих слабополярных жидкостей (например, минеральных масел) имеет значительное практическое преимущество при реализации ЭГД-управления. Поэтому при управлении струями и потоками основные электрофизические параметры рабочих сред изменяются в следующих диапазонах [2–4]: относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 1 \div 3$  (в электрокаплеструйных устройствах нередко используются жидкости на водной основе с  $\varepsilon$ , существенно большей указанной выше); удельная проводимость рабочих жидкостей  $\sigma = 10^{-14} \div 10^{-11}$  (Ом·м) $^{-1}$ ; коэффициент подвижности ионов в рабочих жидкостях  $b \sim 10^{-8}$  м $^2$ /(В·с), в рабочем газе  $b \sim 10^{-4}$  м $^2$ /(В·с); коэффициент диффузии ионов в рабочих жидкостях  $D \sim 10^{-10}$  м $^2$ /с, в рабочих газах  $D \sim 10^{-5}$  м $^2$ /с.

Из практики известно, что чем меньше вязкость рабочих жидкостей, тем эффективнее ЭГД-управление. Поэтому в них коэффициент кинематической вязкости  $\nu$  при 20 °С не превышает  $(30 \div 40) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , а при 50 °С составляет  $(1,7 \div 14,0) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  при плотности жидкости  $\rho = 900 \div 800 \text{ кг}/\text{м}^3$ . В качестве рабочих газов в ЭГД-преобразователях, как правило, используется воздух, плотность которого при нормальных атмосферных условиях (температура 20 °С, давление 0,101 325 МПа) равна 1,205 кг/м<sup>3</sup>, а коэффициент кинематической вязкости при 0 °С составляет  $13,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  и с повышением температуры увеличивается.

**3.** Оценим качественно порядок величин электрических параметров, необходимых для реализации ЭГД-управления. Для этого примем, что к протекающей со скоростью  $v_0$  диэлектрической среде прикладываются максимально возможные величины напряженности  $E_0$  электрического поля, при которых еще не происходит искровой пробой межэлектродного промежутка (как отмечалось выше, искровой пробой является нерабочим режимом преобразователей).

Поскольку при реализации ЭГД-управления наиболее распространенным является случай воздействия электрического поля на заряженный поток жидкости или газа, оценим необходимую величину электрического заряда, которую требуется внести в поток для эффективного ЭГД-управления, в предположении, что плотности электрической и гидроили газодинамической энергии должны быть соизмеримы:

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

Здесь  $l_0$  — характерный линейный размер (например, расстояние между электродами). Тогда

$$\rho_{e0} = \rho v_0^2 / (2 E_0 l_0). \quad (3.1)$$

Величину  $l_0$  выбираем с учетом требований минимизации размеров ЭГД-устройств и ограничения на величину напряжения на электродах преобразователей (порядка  $10^4 \text{ В}$ ).

Пусть  $l_0 = 10^{-3} \text{ м}$ ,  $E_0 = 10^7 \text{ В}/\text{м}$ ,  $v_0 = 1 \text{ м}/\text{с}$ , а плотность рабочей жидкости  $\rho \sim 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Тогда из (3.1) следует, что необходимая объемная плотность электрических зарядов в жидкости составляет  $\rho_{e0} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Кл}/\text{м}^3$ .

Для газов ( $\rho \sim 1 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) при  $E_0 = 10^6 \text{ В}/\text{м}$  из (3.1) имеем  $\rho_{e0} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}/\text{м}^3$ , при этом количество ионов в 1 м<sup>3</sup> газа равно  $\rho_e/e = 3 \cdot 10^{15}$ . Здесь  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  — заряд электрона. Учитывая, что 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 достаточно использовать потоки с малой степенью ионизации потока.

Следует отметить, что без искрового пробоя межэлектродного промежутка указанных выше максимальных напряженностей поля (порядка  $10^7 \text{ В}/\text{м}$ ) невозможно достичь с использованием однородных полей в газе, в частности в воздухе, пробивная напряженность которого порядка  $3 \cdot 10^6 \text{ В}/\text{м}$ . Такие максимальные напряженности поля близки к напряженностям статического пробоя для диэлектрических рабочих жидкостей (минеральных масел). Однако, как показано ниже, они легкодостижимы в относительно узких областях в резко неоднородных полях с использованием простейших конструктивных исполнений электродов.

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 [2, 5, 6] или процессов, возникающих в диэлектрических жидкостях в сильных резко неоднородных электрических полях [2]. 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.

Покажем, что с помощью коронного разряда можно создать необходимые для ЭГД-управления объемные плотности заряда. 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. Из соотношений (2.3)–(2.5) с учетом сферической симметрии легко получить систему уравнений короны. В этом случае уравнение Пуассона (2.3) переписывается в виде

$$2\frac{E_r}{r} + \frac{dE_r}{dr} = \frac{\rho_e}{\varepsilon_0\varepsilon}, \quad (3.2)$$

где  $\varepsilon_0\varepsilon$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость рабочей среды;  $E_r$  — 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 (3.2) получим

$$\rho_{e \max} = 2\varepsilon_0\varepsilon E_{\max}/r. \quad (3.3)$$

Максимальное значение напряженности электрического поля будет у электрода с минимальным радиусом кривизны, т. е. у коронирующего электрода во внутренней области короны, где имеет место биполярная проводимость. Однако нас интересует поток униполярных ионов во внешней области короны, поэтому в (3.3)  $E_{\max}$  — 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

$$\rho_{e \max} = 2\varepsilon_0\varepsilon E_{\max}/r_k. \quad (3.4)$$

Для воздуха  $\varepsilon_0\varepsilon \sim 10^{-11}$  Ф/м и  $E_{\max} \sim 10^6$  В/м. При  $r_k = 10^{-4} \div 10^{-3}$  м, что, как правило, имеет место в ЭГД-преобразователях, из (3.4) получим  $\rho_{e \max} \sim 10^{-1} \div 10^{-2}$  Кл/м<sup>3</sup>, при которых возможна реализация ЭГД-управления потоками газов.

В диэлектрических жидкостях  $E_{\max}$  на один-два порядка выше, чем в воздухе. Вследствие малой подвижности зарядов в жидкости затрудняется создание в них условий для возникновения ударной ионизации, поэтому физический механизм образования униполярных зарядов в резко неоднородных электрических полях для жидкостей и газов разный. Практика показывает, что в рабочих жидкостях ЭГД-преобразователей можно получить большие величины  $\rho_{e \max}$ , чем в газах.

В ряде случаев можно пренебречь толщиной коронирующего слоя и в выражении (3.4) в первом приближении полагать  $r_k \approx r_0$ . Тогда

$$\rho_{e \max} \approx 2\varepsilon_0\varepsilon E_{\max}/r_0. \quad (3.5)$$

Таким образом, для повышения эффективности работы ЭГД-преобразователей с использованием коронного разряда с учетом (3.5) необходимо выбирать возможно меньший

радиус закругления коронирующего электрода. Полученные этим способом плотности заряда текучей среды соответствуют  $\rho_{e0}$ , найденному из условия (2.1) соизмеримости газодинамических (гидродинамических) и электрических сил, и оказываются достаточными для управления ЭГД-преобразователями.

Применение сильных резко неоднородных электрических полей позволяет совместить во времени процессы сообщения униполярного заряда  $\rho_e$  газу или жидкости и создания управляющей объемной силы  $F = \rho_e E$ . Для расчета статических характеристик ЭГД-преобразователей на основе (2.1)–(2.6) или (2.7)–(2.12) необходимо найти распределение плотности объемного заряда  $\rho_e$  и напряженности электрического поля  $E$  по межэлектродному промежутку с учетом конструктивных особенностей тех или иных ЭГД-преобразователей, граничных условий и принятых допущений. Максимальная напряженность  $E_{\max}$  достигается в непосредственной близости от электрода с малым радиусом закругления (коронирующего электрода в газе). Это упрощает конструкцию и электрическую схему ЭГД-преобразователей и, безусловно, является преимуществом рассматриваемого метода преобразования сигналов. Максимальная величина управляющей объемной силы для воздуха и диэлектрической рабочей жидкости составляет соответственно  $10^5$  и  $10^7$  Н/м.

Таким образом, величина управляющей объемной силы ограничена, что накладывает ограничение на величину газо- или гидродинамической мощности, получаемой на выходе ЭГД-преобразователей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Нагорный В. С.** Электрокаплеструйные регистрирующие устройства. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988.
2. **Денисов А. А., Нагорный В. С.** Электродинамические и электрогазодинамические устройства автоматики. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979.
3. **Нагорный В. С., Денисов А. А.** Устройства автоматики гидро- и пневмосистем. М.: Высш. шк., 1991.
4. **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.
5. **Капцов Н. А.** Электрические явления в газах и вакууме. М.: Гостехтеоретиздат, 1950.
6. **Райзер Ю. П.** Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.

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