

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ

Целью данной работы является разработка новой численно-аналитической модели, которая позволяет качественно и количественно воспроизводить процессы диэлектрического барьерного разряда при работе плазменного актуатора. Получено зарождение и развитие стримера для реальных конфигураций плазменных актуаторов на основе данной модели. Разработанная модель диэлектрического барьерного разряда предназначена для адекватного воспроизведения силы Лоренца, действующей на турбулентный поток частично ионизированного воздуха, в широком диапазоне амплитуд и частот приложенного напряжения, а также параметров и свойств диэлектрической поверхности.

Ключевые слова: диэлектрический барьерный разряд, плазменный актуатор, динамика плазмы

Д.О. РЕДЧИЦЬ

Институт транспортних систем і технологій НАН України

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАЗМИ ДИЕЛЕКТРИЧНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ В ПОВІТРІ

Метою даної роботи є розробка нової чисельно-аналітичної моделі, яка дозволяє якісно і кількісно відтворювати процеси діелектричного бар'єрного розряду при роботі плазмового актуатора. Отримано зародження і розвиток стримера для реальних конфігурацій плазмових актуаторів на основі даної моделі. Розроблена модель діелектричного бар'єрного розряду призначена для адекватного відтворення сили Лоренца, що діє на турбулентний потік частково іонізованого повітря, в широкому діапазоні амплітуд і частот прикладеної напруги, а також параметрів і властивостей діелектричної поверхні.

Ключові слова: діелектричний бар'єрний розряд, плазмовий актуатор, динаміка плазми

D.O. REDCHYTS'

Institute of Transport Systems and Technologies of Ukrainian National Academy of Science

MATHEMATICAL MODELING OF PLASMA OF DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE IN AIR

The aim of this work is to develop a new numerical-analytical model that allows to qualitatively and quantitatively reproduce the processes of dielectric barrier discharge at work plasma actuators was developed. The generation and development of the streamer to the real configuration of the plasma actuators was received on the basis of this model. The developed model of dielectric barrier discharge purpose for adequate reproduction of the Lorentz force acting on the turbulent flow of partially ionized air in a wide range of amplitudes and frequencies of the applied voltage, as well as settings and properties of the dielectric surface.

Keywords: dielectric barrier discharge, plasma actuator, plasma dynamics

Введение

Применение плазменных актуаторов (ПА) на основе диэлектрического барьерного разряда (ДБР) относится к числу современных и перспективных способов изменения структуры течения. Совершенствование существующих конструкций плазменных актуаторов и их работы на основе диэлектрического барьерного разряда требует полного анализа всей совокупности протекающих физико-химических процессов, включая как макроскопические характеристики ДБР, так и структуру отдельного микроразряда, а также состав продуктов плазмохимических реакций.

Существующие математические модели динамики частично ионизированного потока опираются на эмпирические константы и пригодны только для отдельных классов течений. Разработка модели для описания процессов, исследуемых в широком диапазоне определяющих параметров, является актуальной и пока не решенной задачей в данной области знаний.

Как показывает практика, для создания математической модели недостаточно просто выписать дифференциальные уравнения, описывающие конкретные физические процессы. Единая система, описывающая разнородные физико-химические процессы сталкивается с проблемой рассогласования по характерным временам и скоростям, разнородностью протекания физических процессов (диффузия, адвекция, кросс-слагаемые в источниковых членах) и их математическим описанием.

Одной из главных проблем является различие масштабов по времени протекания нелинейных физических процессов. Так слишком мелкий шаг интегрирования снижает общую работоспособность на 2-3

порядка. Процессы, приводящие к мелким шагам по времени (например, зарождение стримера) зачастую бывают локальными, т.е. происходят не во все время цикла, а в сравнительно небольшой период цикла. Использование традиционных численных методов связано с чрезвычайно большими и зачастую нерациональными затратами процессорного времени, что в свою очередь, ведет к невозможности проведения вычислительного эксперимента.

Постановка проблемы исследования электродинамики, динамики и химической кинетики плазмы

Исходя из результатов предыдущих исследований по методам математического описания низкотемпературной неравновесной идеальной плазмы [3, 4, 5], в качестве базового выбран диффузионно-дрейфовый подход для описания пространственно-временной структуры диэлектрического барьерного разряда в воздухе при атмосферном давлении, включая кинетические явления и плазмохимические реакции.

В качестве рабочего газа выступает воздух с фиксированной долей азота $N_2/N_{air} = 0,78$ и кислорода $O_2/N_{air} = 0,22$ при нормальном давлении на уровне моря $p = 101325$ Н/м² (1 атм.). Температура воздуха принимается постоянной и равной $T = 300$ К. Общее число молекул азота и кислорода в единице объема составляет $N_{air} = 2,447 \cdot 10^{25}$ 1/м³.

В работе рассматриваются электронно-возбужденные и метастабильные (*) состояния молекул азота $N_2^*(A^3\Sigma_u^+)$, $N_2^*(B^3\Pi_g)$, $N_2^*(a^1\Sigma_u^-)$, $N_2^*(C^3\Pi_u)$ и кислорода $O_2^*(a^1\Delta_g)$, $O_2^*(b^1\Sigma_g^+)$, атомы кислорода O , электроны e , а также положительные N_2^+ , N_4^+ , O_2^+ , O_4^+ и отрицательные ионы O^- , O_2^- , в общей сложности 14 частиц и 97 плазмохимических реакций, включая поверхностные процессы.

Химические реакции включают процессы диссоциации, ионизации молекул электронным ударом из основного состояния, ступенчатую, ассоциативную и фотоионизацию, возбуждение молекул, ионизацию возбужденных (метастабильных) молекул, прилипание и отлипание электронов, рекомбинацию электронов и положительных ионов, химические превращения нейтральных атомов, молекул и ионов, а также процессы вторичной эмиссии электронов из открытого электрода и диэлектрической поверхности.

Так как плазма диэлектрического барьерного разряда является неравновесной, то температура ионов равна температуре воздуха. Температура, подвижность и диффузия электронов, а также коэффициенты некоторых химических реакций (ионизации, возбуждения, прилипания) зависят от напряженности электрического поля и рассчитываются с помощью солвера BOLSIG+ [2], который основан на решении уравнения Больцмана с использованием функции распределения электронов по скоростям и энергиям.

Результаты и обсуждение

С целью верификации разработанной численно-аналитической математической модели проведены тестовые расчеты диэлектрического барьерного разряда при работе плазменного актуатора в неподвижном воздухе при атмосферном давлении.

Исходные данные соответствуют экспериментальным работам [6, 7]. Диэлектрик представляет собой керамический материал Масог с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 6$ и толщиной $d = 2,1$ мм. Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon_r = 1,0006$. Electroды представляют собой полоски меди. Длина открытого электрода составляет 5 мм, а изолированного – 25 мм. К верхнему электроду прикладывалось напряжение амплитудой $\varphi^{\max} = 7$ кВ [6] и $\varphi^{\max} = 12$ кВ [7], частотой 5 кГц и 200 Гц, соответственно. Рассматривается четверть периода колебания приложенного напряжения для демонстрации возможностей разработанной новой математической модели.

В эксперименте диэлектрическая поверхность состояла из мелких сегментов, что дало возможность измерить распределение напряжения по поверхности диэлектрика.

Для адекватного описания зарождения, развития и прохождения стримера используется переменный шаг интегрирования по времени ($\Delta t = 10^{-7} \div 10^{-12}$ с). Начало координат совпадает с правым краем открытого электрода. Многоблочная сетка, описывающая геометрию расчетной области вблизи плазменного актуатора, состоит из 5 блоков: один для воздушной области ($1 \cdot 10^4$ узлов), а четыре для области диэлектрика (по $1 \cdot 10^4$ узлов). Минимальный шаг сетки вблизи правого края открытого электрода $1 \cdot 10^{-5}$ м.

На рисунках 1-3 показано изменение плотности различных химических элементов n плазмы диэлектрического барьерного разряда в пространстве и во времени при $\varphi^{\max} = 7$ кВ [6] и частоте 5 кГц, а также плотность результирующего объемного заряда ρ и компоненты силы Лоренца f_x, f_y , отнесенные к единице объема. Здесь же приведены распределения суммарного $\varphi = \varphi_{el} + \varphi_{\rho, \sigma}$, приложенного φ_{el} электрического потенциалов, а также распределения потенциала от объемного и поверхностного зарядов $\varphi_{\rho, \sigma}$ и модуля напряженности электрического поля $|E|$.

Механизм формирования и развития отдельного микроариза состоит из трех последовательных стадий (рис. 1-3).

На первой стадии с увеличением приложенного напряжения φ_{el} (рис. 1 д) происходит рост напряженности электрического поля вблизи правого края открытого электрода (рис. 1 ж). Это приводит к частичной ионизации воздуха в этой области (рис. 1 а) за счет формирования электронных лавин. На этой стадии концентрация заряженных частиц настолько мала, что результирующий объемный заряд практически не оказывает влияния на внешнее электрическое поле от электродов (рис. 1 г-е).

Четырнадцать рисунков группы (а) представляют собой распределение плотности частиц плазмы в порядке расположения компонент вектора

$$\mathbf{n} = \left[n_{N_4^+}, n_{N_2^+}, n_{N_2(A^3\Sigma_u^+)}, n_{N_2(B^3\Pi_g)}, n_{N_2(a^1\Sigma_u^-)}, n_{N_2(C^3\Pi_u)}, n_{O_4^+}, n_{O_2^+}, n_{O_2}, n_{O^-}, n_{O}, n_{O_2(a^1\Delta_g)}, n_{O_2(b^1\Sigma_g^+)}, n_e \right]^T \text{ для момента}$$

времени $2,500677 \cdot 10^{-5}$ с. Количественные значения распределений параметров приведены в таблице 1.

Электроны, ускоряясь в электрическом поле, ионизируют молекулы азота и кислорода вблизи правого края открытого электрода, формируя электронные лавины, а при попадании на поверхность электрода поглощаются анодом. Когда напряженность электрического поля достигает величины порядка 10^7 В/м, в прианодном слое происходит значительный рост плотности результирующего заряда ρ , образованного положительными ионами азота и кислорода (рис. 1 б). Первая стадия микроразряда длилась $2,5007 \cdot 10^{-5}$ с.

На второй стадии процесса происходит лавинно-стримерный переход, при котором электрическое поле пространственного заряда головки лавины достигает внешнего. В этом случае потенциал от объемного заряда $\varphi_{\rho,\sigma}$ достигает величины приложенного напряжения φ_{el} , что приводит к формированию катода направленного стримера.

В дальнейшем воздух ионизируется благодаря сильному собственному полю стримерной головки (рис. 2 и 3), что приводит к развитию стримера ($t = 2,500850 \cdot 10^{-5}$ с и $t = 2,504733 \cdot 10^{-5}$ с). Стример начинает распространяться от анода и движется над поверхностью диэлектрика. Внутри канала стримера плотность результирующего заряда близка к нулю и существенна лишь на поверхности, особенно в головке стримера (рис. 2 б и 3 б). В результате напряженность внутри стримерного канала значительно ниже, чем вне стримера (рис. 2 ж и 3 ж), что хорошо согласуется с имеющимися физическими представлениями.

На рис. 2 ж видно как потенциал объемного и поверхностного зарядов $\varphi_{\rho,\sigma}$ искажает распределение приложенного потенциала (рис. 2 д). По результатам численного моделирования рассчитаны радиус стримерного канала $10^{-4} \div 10^{-3}$ м, плотность частиц в нём $10^{19} \div 10^{20}$ м⁻³, степень ионизации воздуха $10^{-6} \div 10^{-5}$. Скорость роста стримера порядка 10^6 м/с, что хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными [0]. Продолжительность второй стадии соответствует времени зарождения и распространения стримера, и приблизительно равна $4,3 \cdot 10^{-8}$ с.

При развитии стримера поверхность диэлектрика заряжается, поскольку образующийся объемный заряд при движении в электрическом поле встречает препятствие в виде поверхности диэлектрика и оседает на ней. Адсорбированный заряд искажает поле разрядного промежутка. В результате напряженность электрического поля в воздухе вблизи электродов ослабевает (рис. 3 ж), что приводит к затуханию разряда. Положительный заряд на поверхности диэлектрика обеспечивают в основном ионы азота N_4^+ и кислорода O_4^+ . Распределение поверхностного заряда на диэлектрике (рис. 4) приведено для различных моментов времени (1 – $2,500772 \cdot 10^{-5}$ с, 2 – $2,500850 \cdot 10^{-5}$ с, 3 – $2,501045 \cdot 10^{-5}$ с, 4 – $2,502314 \cdot 10^{-5}$ с, 5 – $2,504733 \cdot 10^{-5}$ с, 6 – $5,0 \cdot 10^{-5}$ с).

На третьей стадии основную роль играют процессы диффузии и дрейфа заряженных частиц к диэлектрической поверхности и открытому электроду. Длительность последней стадии микроразряда порядка $2,495 \cdot 10^{-5}$ с.

Получено распределение электрического потенциала по поверхности диэлектрика при максимальном приложенном к электродам напряжении 7 и 12 кВ (рис. 5). Сплошной линией (—) обозначены результаты настоящей работы, а экспериментальные данные \circ – [6], \square – [7]. Резкое падение напряжения на диэлектрике обусловлено длиной распространения стримера и, как следствие, падением плотности поверхностного заряда. Так, при максимальных значениях приложенного напряжения 7 и 12 кВ длина распространения стримера составляет $L = 0,01$ м и $L = 0,015$ м соответственно. Результаты численного моделирования показывают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

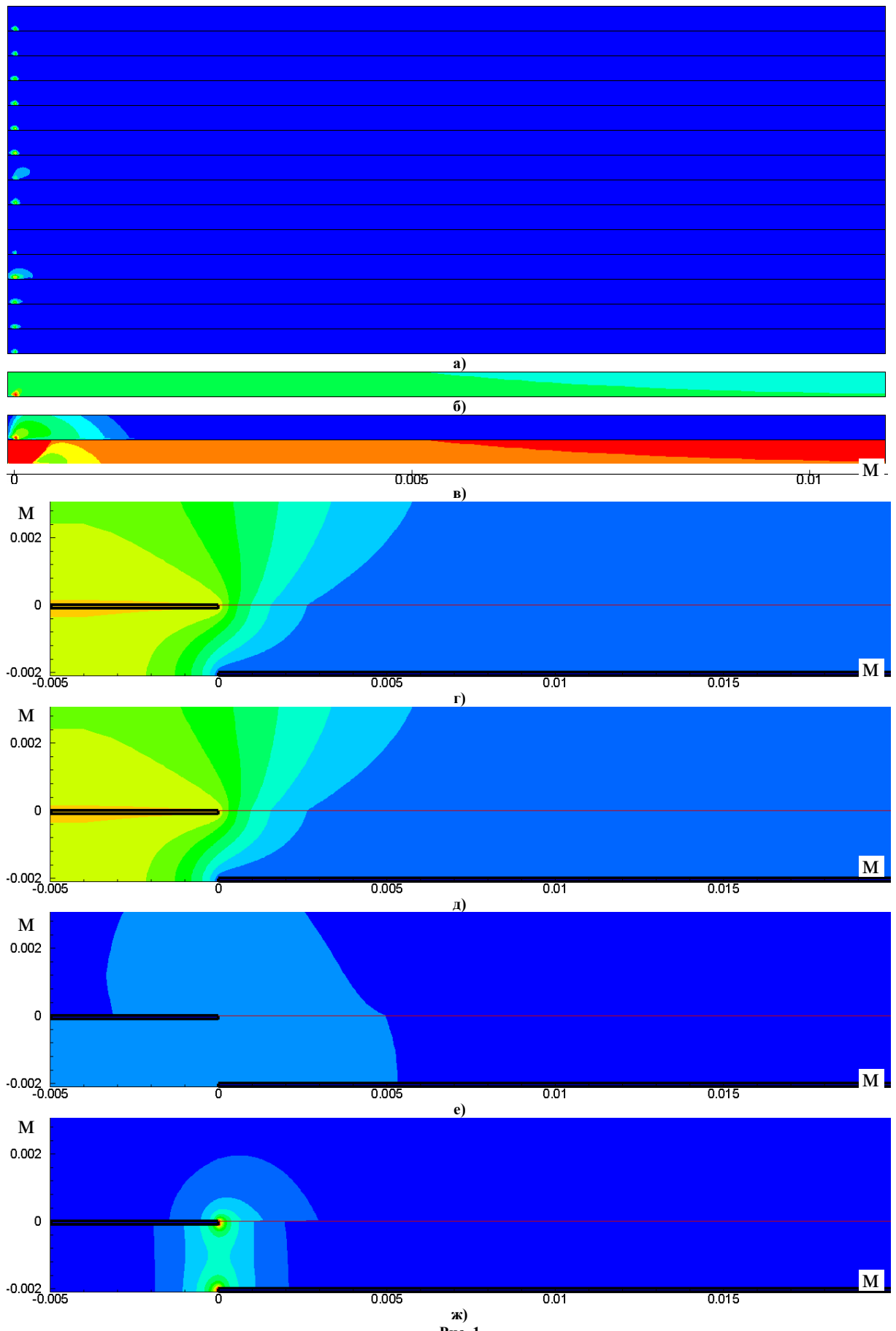


Рис. 1

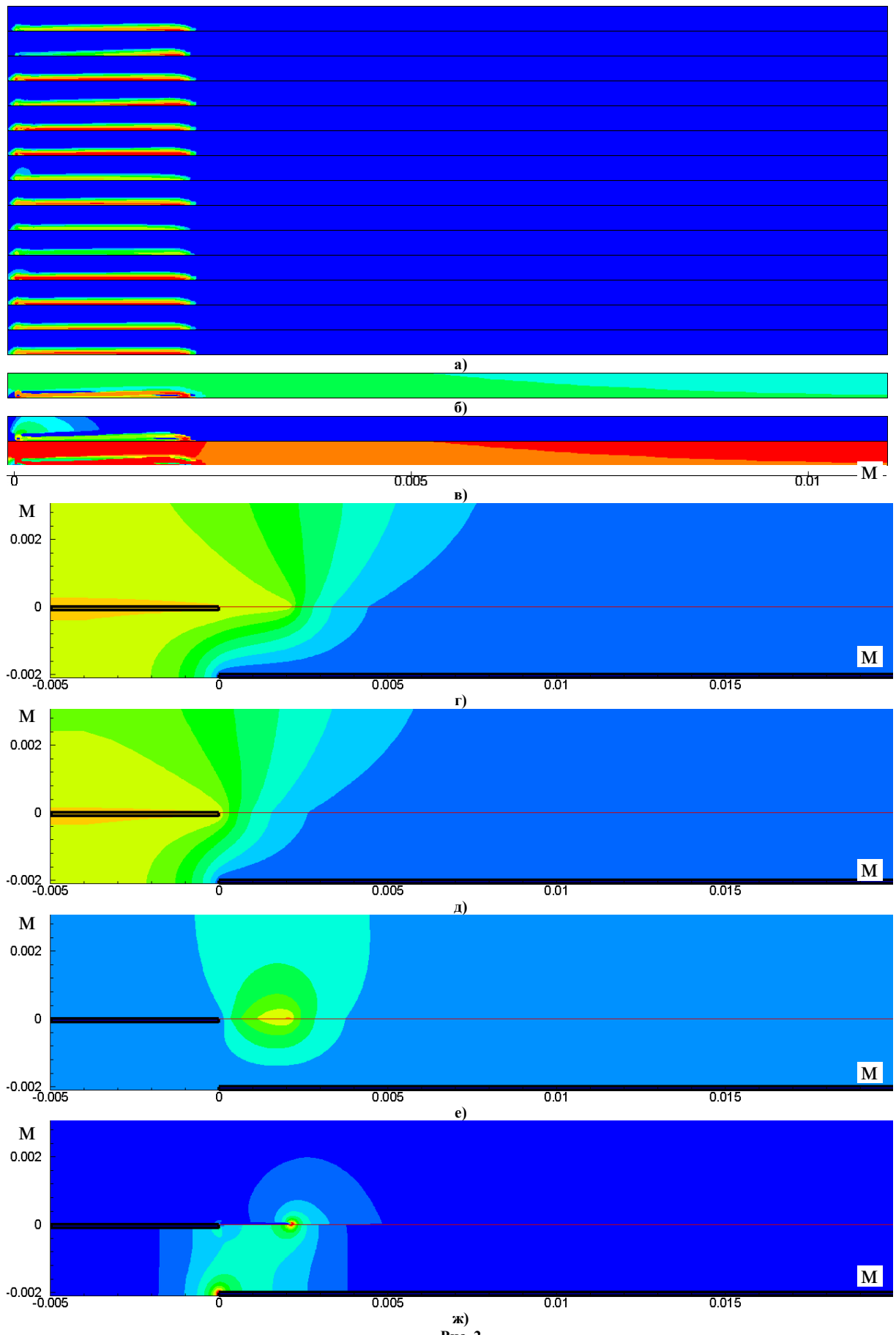


Рис. 2

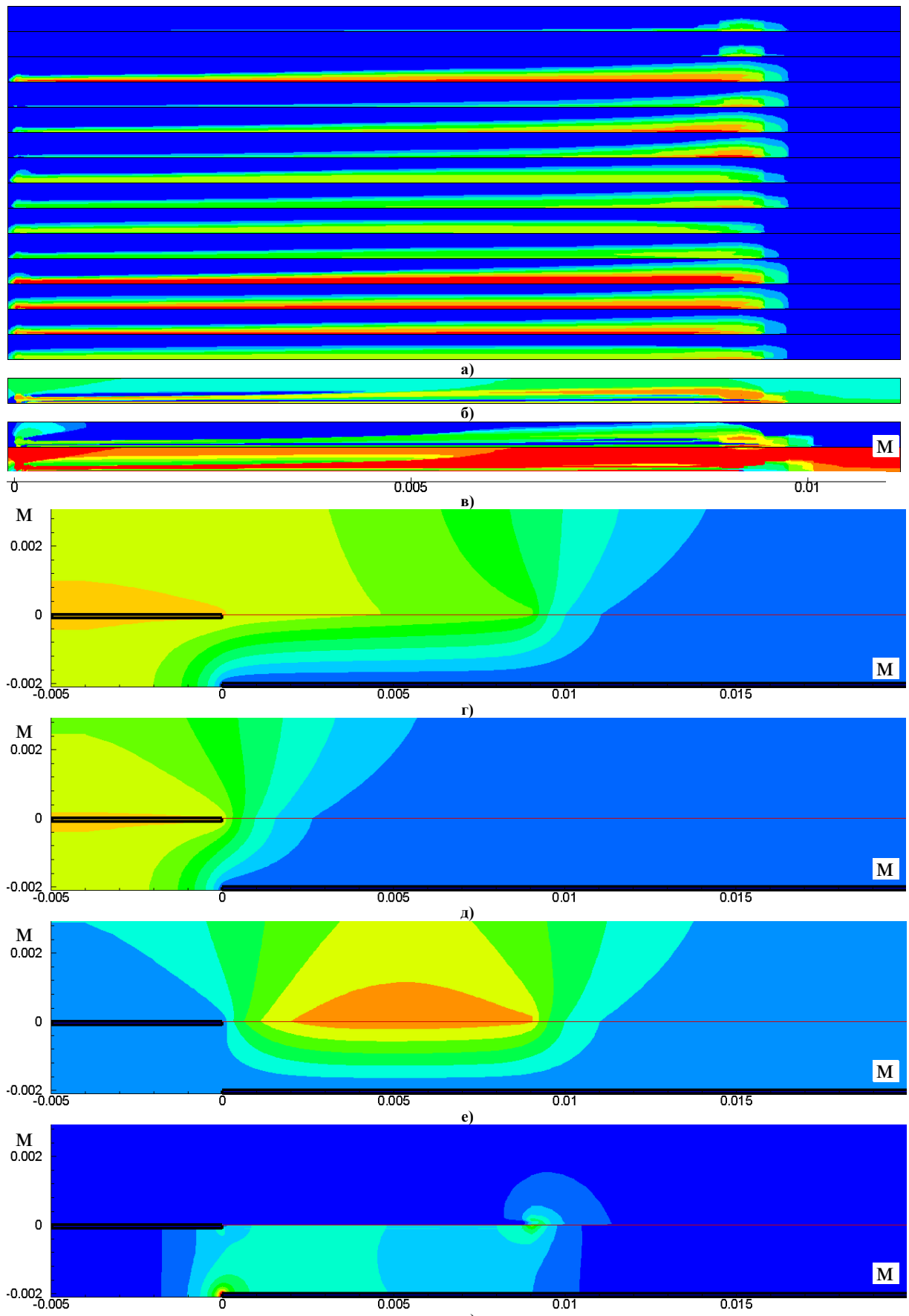


Рис. 3

Таблица 1

$n, 1/\text{M}^3$	$\rho, \text{Кл}/\text{M}^3$	$f_x, \text{H}/\text{M}^3$	$f_y, \text{H}/\text{M}^3$	$\varphi/\varphi^{\max}, \varphi_{el}/\varphi^{\max}$	$\varphi_{p,\sigma}/\varphi^{\max}$	$ E , \text{В}/\text{M}$
1e+21	1	1e+7	0	0,9	0,6	1e+7
1e+20	0,05	1e+6	-1e+1	0,8	0,5	9e+6
1e+19	0,01	1e+5	-1e+2	0,7	0,4	8e+6
1e+18	0,005	1e+4	-1e+3	0,6	0,3	7e+6
1e+17	0	1e+3	-1e+4	0,5	0,2	6e+6
1e+16	-0,005	1e+2	-1e+5	0,4	0,1	5e+6
	-0,01	1e+1	-1e+6	0,3	0	4e+6
		0	-1e+7	0,2		3e+6
				0,1		2e+6
				0		1e+6

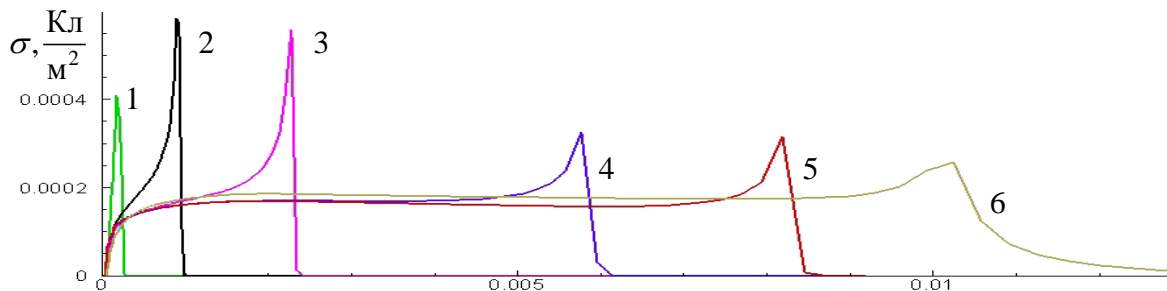


Рис. 4

L, M

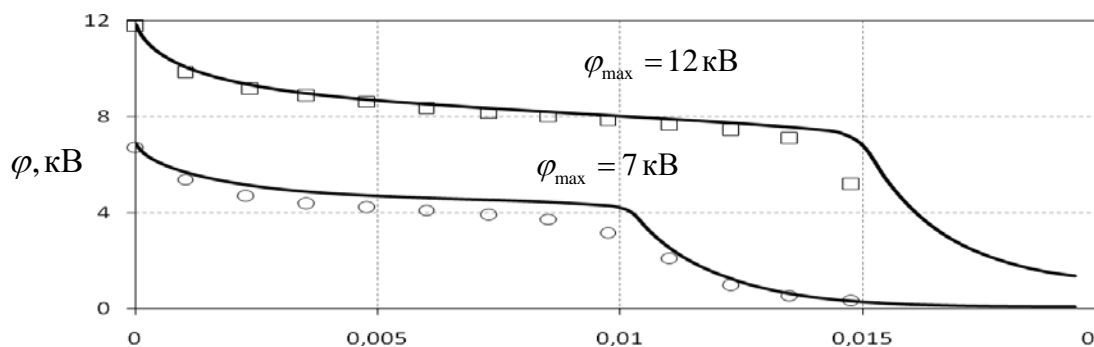


Рис. 5

L, M

Выводы

Основной особенностью разработанной численно-аналитической модели является использование рационального количества уравнений для описания всех основных нестационарных параметров диэлектрического барьерного разряда в воздухе. Выбранные 14 видов частиц обеспечивают высокую точность математического моделирования основных плазмохимических реакций, включая как поверхностные процессы, так и быстротекущие явления в пространстве (развитие стримера и электронных лавин).

Список использованной литературы

1. Abe T. Momentum coupling and flow induction in a DBD plasma actuator / T. Abe, M. Takagaki // AIAA Paper. – 2009. – № 1622. – 8 p.
2. BOLSIG+: Electron Boltzmann equation solver [Электронный ресурс] / Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie (LAPLACE), Université Paul Sabatier. – Toulouse : France, 2013. – Режим доступа : WWW.URL: <http://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/copyright.php>. – 10.02.2013.
3. Forte M. Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity – application to airflow control / M. Forte, J. Jolibois, E. Moreau, G. Touchard // AIAA Paper. – 2006. – № 2863. – P. 9.
4. Kossyi A. Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures / A. Kossyi, A. Kostinsky, A. Matveyev // Plasma Sources Science and Technology. – 1992. – Vol. 1, № 3. – P. 207–220.
5. Nudnova M. Rate of plasma thermalization of pulsed nanosecond surface dielectric barrier discharge / M. Nudnova, S. Kindusheva, N. Aleksahdrov, A. Starikovskiy // AIAA Paper. – 2010. – № 465. – P. 15.
6. Enloe C. Surface potential and electric field structure in the aerodynamic plasma actuator / C. Enloe, T. McLaughlin, J. Gregory, R. Medina, W. Miller // AIAA Paper. – 2008. – № 1103. – P. 11.
7. Font G. Effects of oxygen content on the behavior of the dielectric barrier discharge aerodynamic plasma actuator / G. Font, C. Enloe, J. Newcomb, A. Teague, A. Vasso // AIAA Paper. – 2010. – № 545. – P. 16.