

УДК 532.516

Д.А. РЕДЧИЦ, С.В. ТАРАСОВ, А.С. ТАРАСОВ
Институт транспортных систем и технологий НАН Украины
С.В. МОЙСЕЕНКО
Херсонский национальный технический университет

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКОВ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ

Разработана новая математическая модель низкотемпературной неравновесной идеальной плазмы диэлектрического барьерного разряда в воздухе. В качестве базового выбран диффузионно-дрейфовый подход для описания пространственно-временной структуры, включая нестационарные электродинамические процессы, кинетические явления и плазмохимические реакции. В модели учитываются электронно-возбуждённые и метастабильные состояния молекул азота и кислорода, атомы кислорода, электроны, а также положительные и отрицательные ионы, 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 и ассоциативную ионизацию, 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. Для нестационарных уравнений динамики плазмы разработан неявный численный алгоритм с подитерациями по псевдовремени, который базируется на конечно-объемном подходе. В нестационарных уравнениях для плотности частиц плазмы аппроксимация дрейфовых производных осуществляется с помощью схемы TVD с функцией-ограничителем MinMod. Реализован единый неявный численный алгоритм для эффективного решения неоднородной системы исходных уравнений. Проведена серия вычислительных экспериментов по моделированию нестационарных процессов низкотемпературной неравновесной плазмы диэлектрического барьерного разряда. Проведено детальное изучение стадий зарождения, развития и гашения катодонаправленного стримера для реальных конфигураций плазменных актуаторов на основе разработанной математической модели. Проанализированы нестационарные характеристики плазмы в области над диэлектрической поверхностью, включая распределение плотности частиц, электрического потенциала и компонент силы Лоренца.

Ключевые слова: диэлектрический барьерный разряд; плазменный актуатор; динамика плазмы.

Д.О. РЕДЧИЦЬ, С.В. ТАРАСОВ, А.С. ТАРАСОВ
Інститут транспортних систем і технологій НАН України
С.В. МОЙСЄЄНКО
Херсонський національний технічний університет

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПОТОКІВ ХОЛОДНОЇ ПЛАЗМИ ДІЕЛЕКТРИЧНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ В ПОВІТРІ

Розроблено нову математичну модель низькотемпературної нерівноважної ідеальної плазми діелектричного бар'єрного розряду в повітрі. За базовий обраний

дифузійно-дрейфовий підхід для опису просторово-часової структури, включаючи нестационарні електродинамічні процеси, кінетичні явища та плазмохімічні реакції. У моделі враховуються електронно-збуджені та метастабільні стани молекул азоту та кисню, нейтральні атоми кисню, електрони, а також позитивні та негативні іони, у цілому 14 частинок і 97 плазмохімічних реакцій, включаючи поверхневі процеси. Хімічні реакції включають: процеси дисоціації, іонізації молекул електронним ударом з основного стану; ступінчасту й асоціативну іонізацію, фотоіонізацію; збудження молекул; іонізацію збуджених (метастабільних) молекул; прилипання і відлипання електронів; рекомбінацію електронів і позитивних іонів; хімічні перетворення нейтральних атомів, молекул та іонів, а також процеси вторинної емісії електронів з відкритого електрода і діелектричної поверхні. Для нестационарних рівнянь динаміки плазми розроблено неявний чисельний алгоритм з підітераціями за псевдочасом, який базується на скінченно-об'ємному підході. У нестационарних рівняннях для густини частинок плазми апроксимація дрейфових похідних здійснюється за допомогою схеми TVD з функцією-обмежувачем MinMod. Реалізовано єдиний неявний чисельний алгоритм для ефективного розв'язання неоднорідної системи вихідних рівнянь. Проведено серію обчислювальних експериментів з моделювання нестационарних процесів низькотемпературної нерівноважної плазми діелектричного бар'єрного розряду. Проведено детальне вивчення стадій зародження, розвитку і гасіння катодоспрямованого струмера для реальних конфігурацій плазмових актуаторів на основі розробленої математичної моделі. Проаналізовано нестационарні характеристики плазми в області над діелектричною поверхнею, включаючи розподіл густини частинок, електричного потенціалу і компонент сили Лоренца.

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

D.O. REDCHYTS, S.V. TARASOV, A.S. TARASOV
Institute of Transport Systems and Technologies of Ukrainian National Academy of Science
S.V. MOISEENKO
Kherson National Technical University

NUMERICAL SIMULATION OF UNSTEADY COLD PLASMA STREAMS OF DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE IN AIR

A new mathematical model of a low-temperature non-equilibrium ideal plasma of a dielectric barrier discharge in air is developed. The drift-diffusion approach is chosen as the base for describing the spatial-temporal structure, including unsteady electrodynamic processes, kinetic phenomena, and plasma-chemical reactions. The model takes into account electronically excited and metastable states of nitrogen and oxygen molecules, oxygen atoms, electrons, as well as positive and negative ions, a total of 14 particles and 97 plasma-chemical reactions, including surface processes. Chemical reactions include the processes of dissociation, ionization of molecules by electron impact from the ground state, stepwise and associative ionization, photoionization, excitation of molecules, ionization of excited (metastable) molecules, electron attachment and detachment, recombination of electrons and positive ions, chemical transformations of neutral atoms, molecules and ions, as well as processes of secondary electron emission from an open electrode and a dielectric surface. For unsteady equations of plasma dynamics, an implicit numerical algorithm with pseudo-time iteration is developed, which is based on a finite-volume approach. In unsteady equations for the density of plasma particles, the drift derivatives were approximated using the TVD scheme with the MinMod limit function. A single implicit numerical algorithm for the efficient solution of a nonuniform system of initial equations is implemented. A series of

computational experiments are conducted to simulate the unsteady processes of a low-temperature nonequilibrium plasma of a dielectric barrier discharge. A detailed study of the stages of formation, development, and quenching of a cathode-directed streamer for real configurations of plasma actuators based on the developed mathematical model has been carried out. The unsteady plasma characteristics in the region above the dielectric surface are analyzed, including the distribution of particle density, electric potential, and components of the Lorentz force.

Keywords: dielectric barrier discharge, plasma actuator, plasma dynamics

Постановка проблемы

Применение плазменных актуаторов (ПА) на основе диэлектрического барьерного разряда (ДБР) относится к числу современных и перспективных способов изменения структуры течения воздуха [1–3]. 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 нерешенной 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 эффективность численного алгоритма на 2-3 порядка. Процессы, приводящие к мелким шагам по времени (например, зарождение стримера), зачастую бывают локальными, т.е. происходят 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.

Анализ последних исследований и публикаций

Исходя из результатов предыдущих исследований по методам математического описания низкотемпературной неравновесной идеальной плазмы [6–8], 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.

Цель исследования

Цель работы – построение математической модели для описания параметров нестационарных потоков низкотемпературной плазмы диэлектрического барьерного разряда в воздухе.

Изложение основного материала исследования

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 $p = 101325 \text{ Н/м}^2$ (1 атм.). Температура воздуха принимается постоянной и равной $T = 300 \text{ К}$. Общее число молекул азота и кислорода в единице объема составляет $N_{air} = 2,447 \cdot 10^{25} \text{ 1/м}^3$. 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 и ассоциативную ионизацию, 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+ [5], который основан на решении уравнения Больцмана с использованием функции распределения электронов по скоростям и энергиям.

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 [9–10]. Диэлектрик представляет собой керамический материал Масог с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 6$ и толщиной $d = 2,1 \text{ мм}$. 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 $\phi^{\max} = 7 \text{ кВ}$ [9] и $\phi^{\max} = 12 \text{ кВ}$ [10], частотой 5 кГц и 200 Гц, соответственно. Рассматривается четверть периода колебания приложенного напряжения для демонстрации возможностей разработанной новой математической модели.

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

Для адекватного описания зарождения, развития и прохождения стримера используется переменный шаг интегрирования по времени ($\Delta t = 10^{-7} \div 10^{-12} \text{ с}$). 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 $1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$.

На рис. 1–3 показано изменение плотности различных химических элементов \mathbf{n} плазмы диэлектрического барьерного разряда в пространстве и во времени при $\varphi^{\max} = 7$ кВ [9] 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} электрических потенциалов, а также распределения потенциала от объемного и поверхностного зарядов $\varphi_{\rho, \sigma}$ и модуля напряженности электрического поля $|E|$.

Механизм формирования и развития отдельного микроразряда 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

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

для момента времени $2,500677 \cdot 10^{-5}$ с. Количественные значения распределений параметров приведены в табл. 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 катодонаправленного 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 [4]. Продолжительность второй стадии соответствует времени зарождения и распространения стримера, и приблизительно равна $4,3 \cdot 10^{-8}$ с.

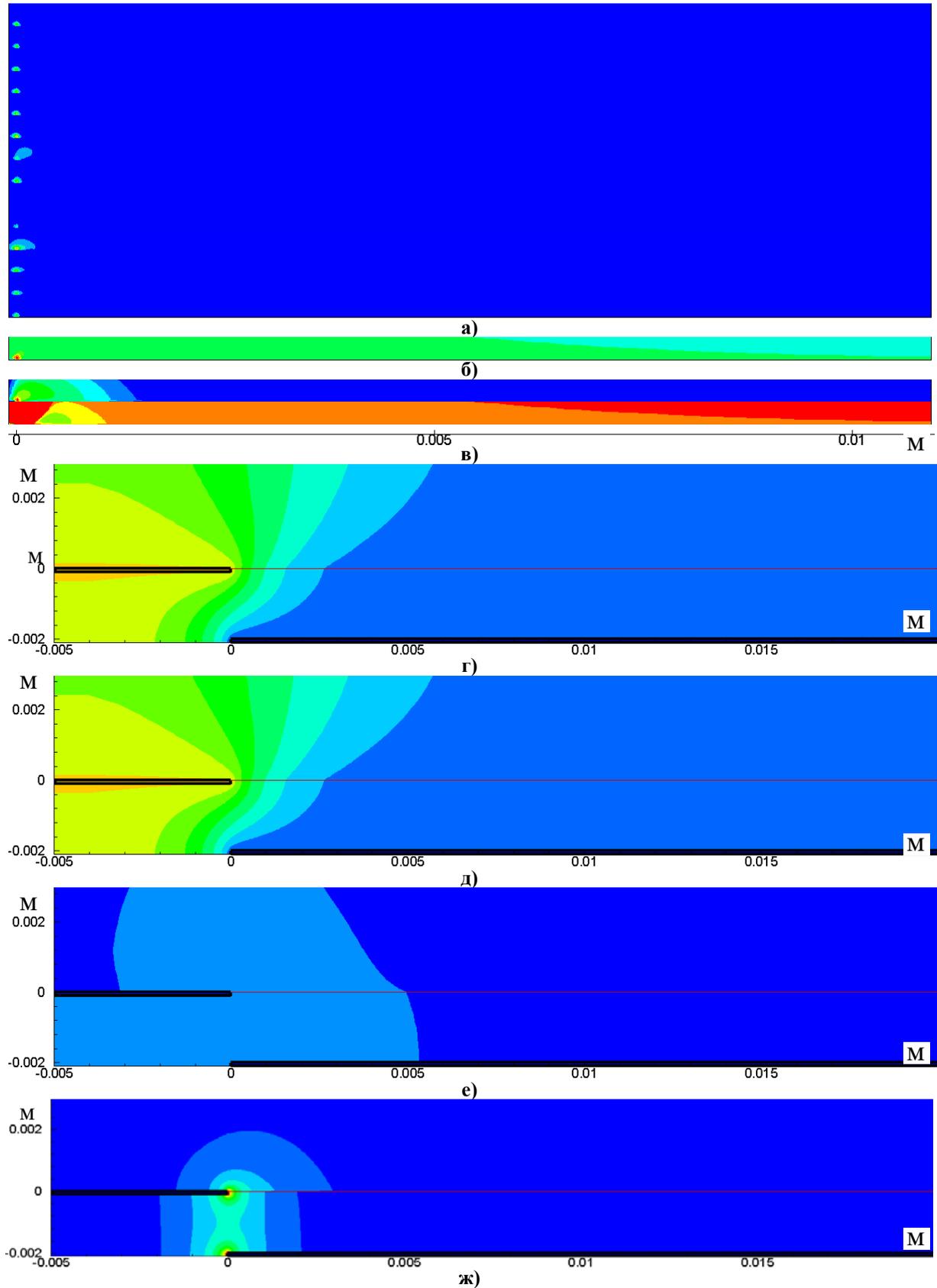


Рис. 1. Распределение плотности химических элементов плазмы (а), объемного заряда (б), компонент силы Лоренца (в), суммарного (г), приложенного (д) электрических потенциалов, а также потенциала от объемного и поверхностного зарядов (е) и модуля напряженности электрического поля (ж) для момента времени $2.500772 \cdot 10^{-5}$ с.

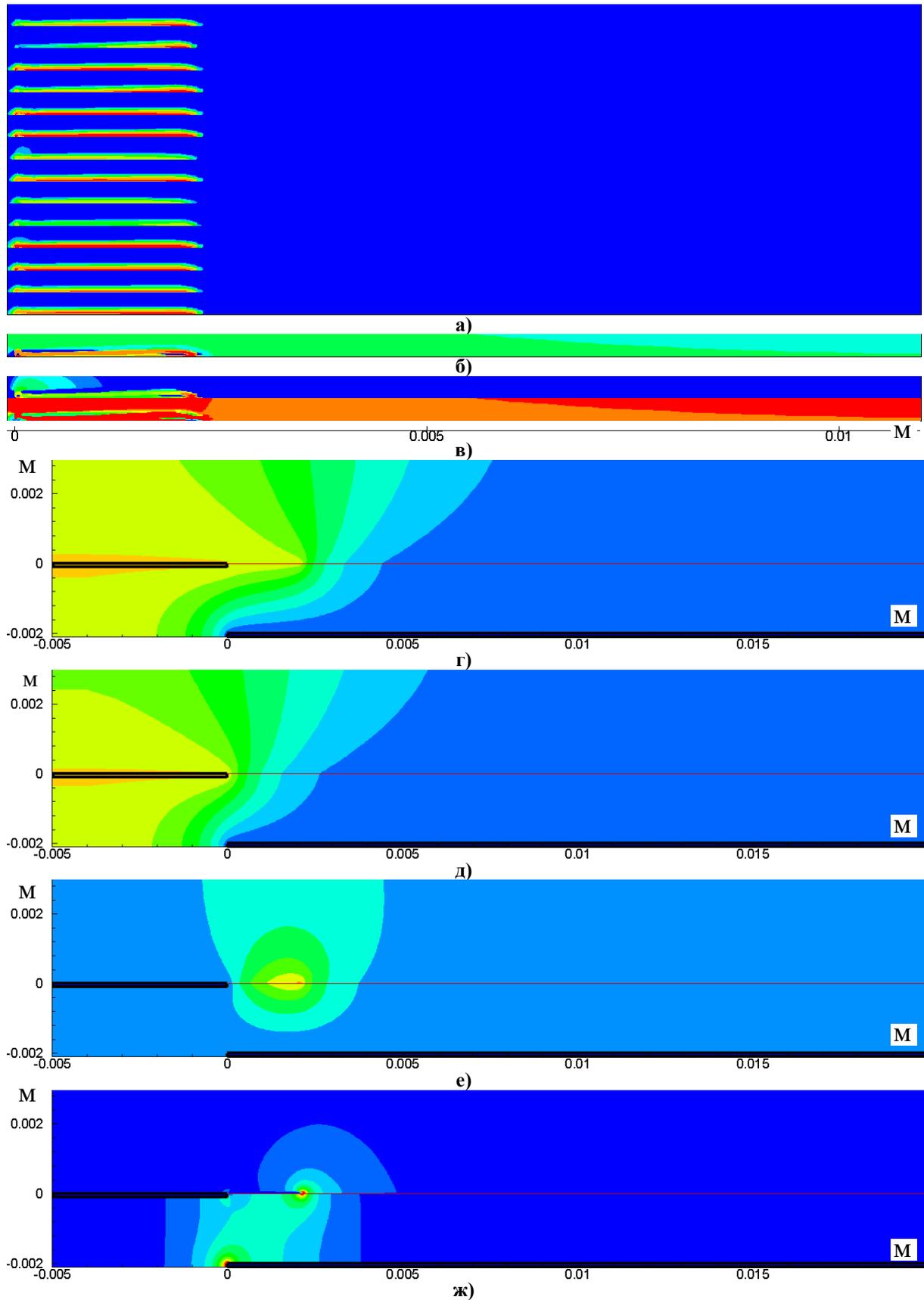


Рис. 2. Распределение плотности химических элементов плазмы (а), объемного заряда (б), компонент силы Лоренца (в), суммарного (г), приложенного (д) электрического потенциалов, а также потенциала от объемного и поверхностного зарядов (е) и модуля напряженности электрического поля (ж) для момента времени $2.500850 \cdot 10^{-5}$ с.

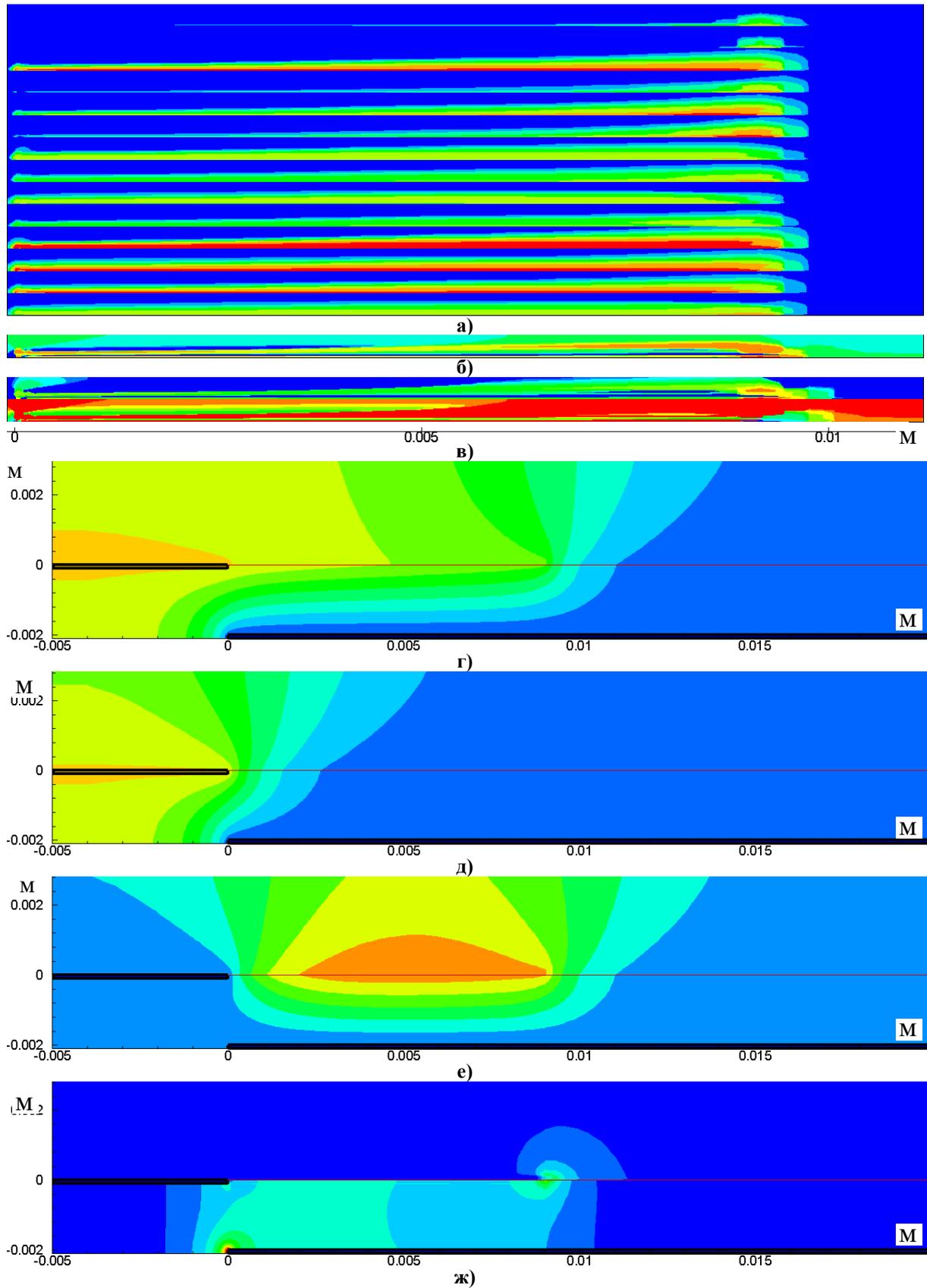


Рис. 3. Распределение плотности химических элементов плазмы (а), объемного заряда (б), компонент силы Лоренца (в), суммарного (г), приложенного (д) электрических потенциалов, а также потенциала от объемного и поверхностного зарядов (е) и модуля напряженности электрического поля (ж) для момента времени $2.504733 \cdot 10^{-5}$ с.

Таблиця 1

Количественные значения распределений параметров

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

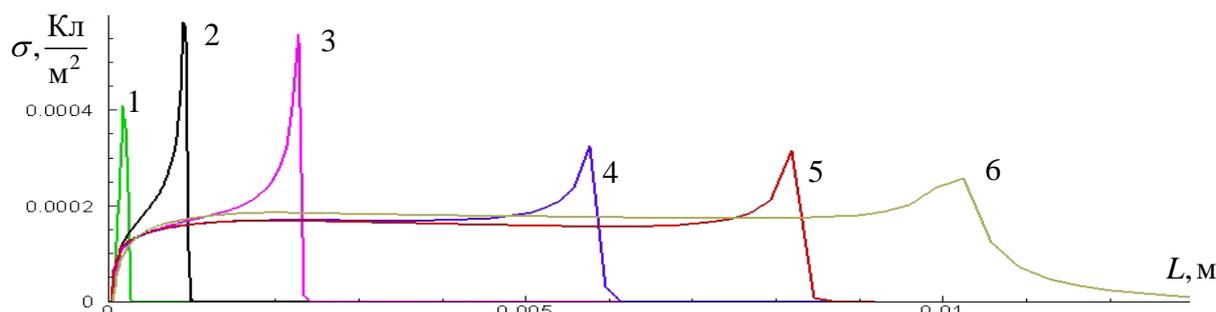


Рис. 4. Распределение поверхностного заряда на диэлектрике для различных моментов времени (1 – $2.500772 \cdot 10^{-5}$ с, 2 – $2.500850 \cdot 10^{-5}$ с, 3 – $2.501045 \cdot 10^{-5}$ с, 4 – $2.502314 \cdot 10^{-5}$ с, 5 – $2.504733 \cdot 10^{-5}$ с, 6 – $5.0 \cdot 10^{-5}$ с).

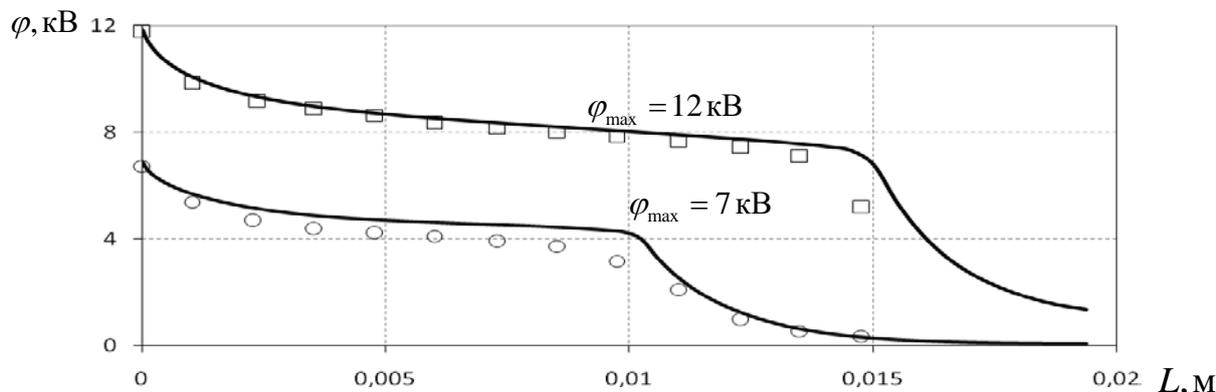


Рис. 5. Распределение электрического потенциала по поверхности диэлектрика (— – настоящая работа, ○ – [9], □ – [10])

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 чего 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 – [9], \square – [10]. 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.

Выводы

Построена новая физически обоснованная математическая модель низкотемпературной плазмы диэлектрического барьерного разряда в воздухе для описания пространственно-временной структуры, которая качественно и количественно воспроизводит нестационарные электродинамические, плазмохимические процессы и кинетические явления при частичной ионизации воздуха плазменными актуаторами. 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. Редчиц Д. А., Моисеенко С. В. Математическое моделирование дозвукового турбулентного обтекания колеблющегося профиля NASA 0015. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2018. № 2. С. 133–145. DOI: 10.32782/2618-0340-2018-2-133-145.
2. Prikhod'ko A. A., Redtchits D. A. Numerical Modeling of a Viscous Incompressible Unsteady Separated Flow Past a Rotating Cylinder. *Fluid Dynamics*. 2009. Vol. 44, № 6. P. 823–829. DOI: 10.1134/S0015462809060040.
3. Redchits D. O., Shkvar E. A., Moiseienko S. V. Control of Karman Vortex Street by using Plasma Actuators. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. 2019. Vol. 15, № 5. P. 509–525. DOI: 10.32604/fdmp.2019.08266.
4. Abe T., Takagaki M. Momentum Coupling and Flow Induction in a DBD Plasma Actuator. *AIAA Paper*. 2009. № 4068. 8 p. DOI: 10.2514/6.2009-4068.
5. Hagelaar G. J., Pitchford L. C. Solving the Boltzmann Equation to Obtain Electron Transport Coefficients and Rate Coefficients for Fluid Models. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2005. Vol. 14, № 4. P. 722–733. DOI: 10.1088/0963-0252/14/4/011.
6. Forte M., Jolibois J., Moreau E., Touchard G., Cazalens M. Optimization of a Dielectric Barrier Discharge Actuator by Stationary and Non-Stationary Measurements of the Induced Flow Velocity—Application to Airflow Control. *AIAA Paper*. 2006. № 2863. 9 p. DOI: 10.2514/6.2006-2863.
7. Kossyi A. Yu., Matveyev A. A., Silakov V. P. Kinetic Scheme of the Non-Equilibrium Discharge in Nitrogen-Oxygen Mixtures. *Plasma Sources Science and Technology*. 1992. Vol. 1, № 3. P. 207–220. DOI: 10.1088/0963-0252/1/3/011.
8. Nudnova M., Kindusheva S., Aleksahdrov N., Starikovskiy A. Rate of Plasma Thermalization of Pulsed Nanosecond Surface Dielectric Barrier Discharge. *AIAA Paper*. 2010. № 465. 15 p. DOI: 10.2514/6.2010-465.

9. Enloe C., McLaughlin T., Gregory J., Medina R., Miller W. Surface Potential and Electric Field Structure in the Aerodynamic Plasma Actuator. *AIAA Paper*. 2008. № 1103. 11 p. DOI: 10.2514/6.2008-1103.
10. Font G., Enloe C., Newcomb J., Teague, A., Vasso A. Effects of Oxygen Content on the Behavior of the Dielectric Barrier Discharge Aerodynamic Plasma Actuator. *AIAA Paper*. 2010. № 545. 16 p. DOI: 10.2514/6.2010-545.

References

1. Redchyts, D. O. & Moiseienko, S. V. (2018). Matematicheskoe modelirovanie dozvukovogo turbulentnogo obtekaniya koleblyuschegosya profilya NACA 0015. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuвання*. **2**, 133–145. DOI: 10.32782/2618-0340-2018-2-133-145.
2. Prikhod'ko, A. A. & Redtchits, D. A. (2009). Numerical Modeling of a Viscous Incompressible Unsteady Separated Flow Past a Rotating Cylinder. *Fluid Dynamics*. **44**, 6, 823–829. DOI: 10.1134/S0015462809060040.
3. Redchyts, D. O., Shkvar, E. A. & Moiseienko S. V. (2019). Control of Karman Vortex Street by using Plasma Actuators. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. **15**, 5, 509–525. DOI: 10.32604/fdmp.2019.08266.
4. Abe, T. & Takagaki, M. (2009). Momentum Coupling and Flow Induction in a DBD Plasma Actuator. *AIAA Paper*. **4068**, 8 p. DOI: 10.2514/6.2009-4068.
5. Hagelaar, G. J. & Pitchford, L. C. (2005). Solving the Boltzmann Equation to Obtain Electron Transport Coefficients and Rate Coefficients for Fluid Models. *Plasma Sources Sci. Technol.* **14**, 4, 722–733. DOI: 10.1088/0963-0252/14/4/011.
6. Forte, M., Jolibois, J., Moreau, E., Touchard, G. & Cazalens, M. (2006). Optimization of a Dielectric Barrier Discharge Actuator by Stationary and Non-Stationary Measurements of the Induced Flow Velocity – Application to Airflow Control. *AIAA Paper*. **2863**, 9 p. DOI: 10.2514/6.2006-2863.
7. Kossyi, A., Kostinsky, A., Matveyev, A. & Silakov, V. (1992). Kinetic Scheme of the Non-Equilibrium Discharge in Nitrogen-Oxygen Mixtures. *Plasma Sources Science and Technology. Technical Physics*. **1**, 3, 207–220. DOI: 10.1088/0963-0252/1/3/011.
8. Nudnova, M., Kindusheva, S., Aleksahdrov, N. & Starikovskiy, A. (2010). Rate of Plasma Thermalization of Pulsed Nanosecond Surface Dielectric Barrier Discharge. *Technical Physics*. **465**, 15 p. DOI: 10.2514/6.2010-465.
9. Enloe, C., McLaughlin, T., Gregory, J. & Medina, R. (2008). Surface Potential and Electric Field Structure in the Aerodynamic Plasma Actuator. *AIAA Paper*. **1103**, 11 p. DOI: 10.2514/6.2008-1103.
10. Font, G., Enloe, C., Newcomb, J., Teague, A., Vasso, A. (2010). Effects of Oxygen Content on the Behavior of the Dielectric Barrier Discharge Aerodynamic Plasma Actuator. *AIAA Paper*. **545**, 16 p. DOI: 10.2514/6.2010-545.

Редчиц Дмитрий Александрович – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник отдела новых и нетрадиционных видов транспорта Института транспортных систем и технологий НАН Украины, e-mail: redchits_da@ua.fm, ORCID: 0000-0001-8538-6026.

Тарасов Сергей Васильевич – к.т.н., заведующий отделом технической механики и энергетических систем Института транспортных систем и технологий НАН Украины, e-mail: tsv@westa-inter.com, ORCID: 0000-0002-9254-1503.

Тарасов Андрей Сергеевич – младший научный сотрудник отдела сверхпроводящих левитирующих систем Института транспортных систем и технологий НАН Украины, e-mail: tarik2004@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9524-6510.

Моисеенко Светлана Викторовна – к.т.н., доцент кафедры высшей математики и математического моделирования Херсонского национального технического университета, e-mail: 4moiseenko@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5802-3887.