

УДК 537.5

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЛЕЮЩИХ РАЗРЯДОВ В ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ

М.В. Чернышева^a, А.С. Чирцов^{b,c}, Д.А. Швагер^b

^a Институт фундаментальной электроники, Париж, 91405, Франция

^b Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^c Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

Адрес для переписки: alex_chirtsov@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 25.07.16, принята к печати 25.08.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-903-916

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Чернышева М.В., Чирцов А.С., Швагер Д.А. Сравнительный анализ плазмохимических моделей для компьютерного моделирования тлеющих разрядов в воздушных смесях // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 5. С. 903–916. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-903-916

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты исследования возможности численного моделирования разрядов в газовых смесях в рамках современной модели нелокальной плазмы путем построения последовательности плазмохимических и численных моделей тлеющего разряда и сопоставления получаемых по ним результатов с экспериментом. **Метод.** Использован метод создания серий поэтапно усложняющихся моделей. Его сущность заключается в расширении номенклатуры учитываемых элементарных процессов в нелокальной плазме тлеющего разряда в воздухе. Воздух рассматривается как смесь азота и кислорода при пониженных давлениях в условиях, удобных для экспериментальной проверки. Для каждой итерации схемы плазмохимических процессов построены соответствующие численные модели газоразрядной плазмы. С их помощью рассчитаны зависимости от давления электрических параметров разрядного промежутка. Расчетные зависимости сопоставлены с экспериментом и результатами предшествующих компьютерных моделей. **Основные результаты.** Создана модель, обеспечивающая хорошее согласие с экспериментально полученными зависимостями падения напряжения на разрядном промежутке от давления газа в областях нормального и аномального тлеющих разрядов. С помощью уточненной модели подобрано оптимальное значение коэффициента вторичной электронной эмиссии с катода. Получены пространственные распределения внутренних параметров нелокальной плазмы (продольные и поперечные профили электрического потенциала, концентраций электронов и ионов, электронной температуры), подлежащие дальнейшей экспериментальной проверке. **Практическая значимость.** Созданные модели перспективны для диагностики параметров и настройки свойств микроразрядов в воздухе. Полученные модели имеют множество потенциальных приложений, включая развиваемый метод электронной столкновительной спектроскопии (CES) газовых смесей.

Ключевые слова

тлеющий разряд, численное моделирование, положительный столб, прикатодный слой, нормальный разряд, аномальный разряд, полуэмпирическая модель, двумерная модель

COMPARATIVE ANALYSIS OF PLASMA-CHEMICAL MODELS FOR COMPUTER SIMULATION OF GLOW DISCHARGES IN AIR MIXTURES

M.V. Tchernycheva^a, A.S. Chirtsov^{b,c}, D.A. Shvager^b

^a Institut d'Electronique Fondamentale Paris, 91405, France

^b ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^c Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

Corresponding author: alex_chirtsov@mail.ru

Article info

Received 25.07.16, accepted 25.08.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-903-916

Article in Russian

For citation: Tchernycheva M.V., Chirtsov A.S., Shvager D.A. Comparative analysis of plasma-chemical models for computer simulation of glow discharges in air mixtures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 5,

Abstract

Subject of Research. We present research results for numerical modeling possibility of discharges in gas mixtures within the modern model of nonlocal plasma by creation a sequence of plasma-chemical and numerical models and comparing the results with experimental data. **Method.** Creation method for series of models with gradually increasing complexity has been used. It is based on a step by step expansion of the range accounted for elementary processes in nonlocal glow discharge plasma in the air. The air is approximated by the mixture of nitrogen and oxygen at low pressures under conditions suitable for experimental verification. For each iteration of plasma chemical scheme, corresponding numerical models of gas-discharge were created. The graphs of the discharge gap electrical parameters on the pressure were obtained by this method. Theoretical data obtained at each step have been compared to the experimental data and the results of previous computer models. **Main Results.** The model has been created that provides a good agreement with the experimentally obtained dependencies of the voltage drop across the discharge gap on the gas pressure in the areas of normal and abnormal glow discharge. By the updated model the optimum value for the coefficient of secondary electron emission from the cathode was chosen. Additionally, we have obtained the spatial distribution of the internal parameters of nonlocal plasma (longitudinal and transverse profiles of the electric potential, electron and ion densities, the electron temperature) as a subject to further experimental verification. **Practical Relevance.** The created models are perspective to be used for diagnosis and the setting of parameters of micro-discharges in the air. They have different applications, including developing method of electronic collision spectroscopy (CES) gas mixtures.

Keywords

glow discharge, numerical modeling, positive glow, cathode layer, normal discharge, abnormal glow, semi-empirical model, two-dimensional model

Введение

Роль компьютерного моделирования в современной физике низкотемпературной плазмы весьма велика [1]. Это обусловлено целым набором причин. Во-первых, на микроскопическом уровне состояние плазмы газового разряда определяется большим числом элементарных столкновительных и радиационных процессов, выделение из которых компактной группы, определяющей макроскопические параметры газоразрядной среды, как правило, оказывается невозможным. При построении теоретических моделей газового разряда это затрудняет построение претендующих на адекватное количественное описание аналитических решений [2, 3] и даже в случае использования усредненных гидродинамических подходов требует решения систем из большого числа дифференциальных уравнений в частных производных для концентраций, учитываемых компонент плазмы и электрических параметров разрядного промежутка [4]. Так, например, даже весьма упрощенная модель плазмы тлеющего разряда в наиболее удобном для теоретического рассмотрения чистом инертном газе уже включает 7–10 плазмохимических реакций [5, 6]. В случае разрядов в молекулярных газах и, более того, в газовых смесях количество элементарных процессов быстро возрастает из-за необходимости учета колебательных и вращательных степеней свободы и наличия реакций между различными атомами и молекулами. Из-за того, что в кинетике плазмы существенная роль принадлежит происходящим на стенках разрядного объема процессам рекомбинации и деактивации, адекватное описание газового разряда даже в однородной цилиндрической трубке не может базироваться на одномерных аналитических моделях. Переход к моделям с большей размерностью, как правило, делает численное моделирование безальтернативным и нередко приводит к результатам, принципиально отличающимся от одномерных теорий не только на количественном, но и на качественном уровне [7]. Дополнительные вычислительные сложности, делающие численное моделирование практически безальтернативным методом теоретического описания неравновесной низкотемпературной плазмы, связаны с использованием завоевывающих популярность нелокальных моделей [8], в рамках которых кинетика микропроцессов в рассматриваемой области плазмы определяется не только локальными параметрами последней, но и ее состоянием в прилегающих и даже удаленных областях.

Сложность и многовариантность описанной задачи требует не только мощных вычислительных ресурсов, но и средств автоматизации генерации соответствующих физическим моделям алгоритмов численного моделирования и реализующих их программных кодов. Заметный прогресс в этом направлении связан с появлением плазменного модуля для профессиональной среды численного моделирования COMSOL [9], требующего от пользователя лишь исчерпывающего описания созданной им плазмохимической модели газоразрядной плазмы, геометрических параметров разрядного промежутка и характеристик схемы электрического питания разряда.

Выбор значений констант скоростей плазмохимических реакций, входящих в выражающие законы сохранения числа частиц уравнения неразрывности, представляет собой отдельную задачу, возникающую при формализации физической модели. Поставляющие такую информацию систематические экспериментальные исследования столкновительных переходов между стационарными состояниями атомов и молекул ведутся практически с середины XX века и позволили создать весьма обширные базы данных по сечениям и скоростям элементарных процессов [10–15]. Имеющихся в литературе данных такого рода, как правило, оказывается недостаточно для построения даже заведомо упрощенных, но физически непротиворечивых (замкнутых) гидродинамических моделей плазмы. В описанной ситуации возрастает

потребность в простых и надежных средствах теоретического расчета вероятностных характеристик элементарных процессов в плазме, ресурсоемкость которых допускает проведение систематических вычислений для большого числа процессов, включаемых в модели. В случае играющих наиболее важную роль в физике газового разряда взаимодействий атомов и молекул с бесструктурными частицами (электронами и фотонами) приемлемую точность для рассматриваемого класса задач обеспечивает борновское приближение, основанное на использовании первого порядка теории возмущений, в котором вызывающие переходы частицы описываются с помощью плоских волн [16]. Построение необходимых для расчета борновских сечений волновых функций многоэлектронных атомов и молекул также требует использования ресурсоемкого метода Хартри–Фока [17] или его упрощенных вариантов, частично использующих эмпирические данные об атомах или молекулах [18, 19].

Еще одной причиной роста популярности численного моделирования газовых разрядов является стремительное расширение области их прикладного использования. На фоне многочисленных применений газоразрядной плазмы [1–3] весьма перспективными выглядят исследования по ее использованию в медицине [20, 21], пищевой промышленности [22], химическом анализе и экологическом мониторинге [23] разрядов с управляемыми характеристиками, зажигаемых в воздушных смесях при атмосферном давлении. Создание таких разрядов практически не требует специального оборудования и способно обеспечить мягкое (щадящее) воздействие на обрабатываемые объекты. В частности, в [23] экспериментально продемонстрирована принципиальная возможность мониторинга химического состава газовых смесей в микроразрядных ячейках в результате использования оригинального метода электронной столкновительной спектроскопии (CES), основанного на анализе особенностей функции распределения электронов по энергиям, обусловленных возникающими в процессе пеннинговской ионизации группами характеристических электронов.

Технические разработки, основанные на использовании управляемых микроразрядов и анализе их характеристик, затруднены тем, что экспериментальное определение внутренних параметров газоразрядных сред в предельно малых объемах трудно осуществить. Численное моделирование в сочетании с сопоставлением его результатов с доступными для экспериментального измерения параметрами микроразрядной плазмы может выступать как эффективный метод полумпирического определения внутренних, трудно доступных для прямых измерений параметров микроразрядных сред.

Описанная схема широкого использования численного моделирования в физике низкотемпературной нелокальной плазмы выглядит весьма привлекательной и работоспособной. Последнее объясняет наблюдающийся в последнее десятилетие в физике низкотемпературной плазмы небывалый всплеск числа работ, посвященных численному моделированию газового разряда (см., например, [24–33]). Все возрастающее число работ в этой области уже позволяет говорить о некоторой негативной тенденции к замещению реального физического эксперимента в области низкотемпературной плазмы его компьютерными симуляциями. Определенной опасностью чрезмерного увлечения компьютерными экспериментами, не подкрепляемыми физическими измерениями, являются сохраняющаяся на сегодняшний день априорная неоднозначность задания плазмохимической модели и низкая (порядка 30%) точность информации о вероятностях элементарных процессов, учитываемых в рамках физической модели. В этой связи представляется весьма актуальным сопоставление результатов моделирования разрядов в воздушных смесях с данными экспериментов в удобных для измерений диапазонах условий, обеспечивающих высокую надежность этих данных. Указанный путь был использован в настоящей работе, посвященной разработке и проверке в удобной для экспериментальных измерений области численной модели тлеющего разряда в воздушной смеси при пониженных давлениях, ориентированной на ее дальнейшую экстраполяцию в трудно доступную для исследований в реальных физических экспериментах область атмосферных микроразрядов.

Экспериментальные исследования и полумпирическое моделирование тлеющего разряда как источник данных для верификации численных моделей

В рамках сформулированной программы на описанной в [34] экспериментальной установке (рис. 1) была выполнена серия измерений зависимости падения напряжения на разрядном промежутке u от величины питающего разрядную цепь напряжения U и давления p воздушной смеси в разрядной ячейке (рис. 2).

Тлеющий разряд зажигался в межэлектродном промежутке длиной 500 мм в трубке диаметром 50 мм, откачиваемой до давления от нескольких торр до сотых тора, от подключаемого через балластное сопротивление в 5 МОм и регулируемого на интервале от 0 до 10 кВ источника. При питающих напряжениях $U = 3–10$ кВ наблюдался устойчивый тлеющий разряд с четко выраженной прикатодной областью и стратифицированным положительным столбом. В области высоких давлений зависимость $u(p)$ имела четко выраженный гистерезисный характер, обусловленный различием между напряжениями зажигания и срыва разряда. Вне зависимости от величины питающего напряжения U характер горения раз-

ряда в области гистерезиса был крайне неустойчивым, что существенно ухудшало воспроизводимость результатов измерений по сравнению с зоной устойчивого горения разряда.

Оценки нормальной величины плотности тока по [2] показали, что в выбранных условиях на рабочем интервале давлений реализуются два режима горения тлеющего разряда – нормальный и аномальный. Первый режим примерно соответствует возрастающему участку зависимости $u(p)$ в области относительно более высоких давлений, второй (аномальный) режим возникает в области низких давлений на спадающей ветви указанной зависимости.



Рис. 1. Экспериментальная установки для изучения газового разряда: схема установки (а); общий вид установки (б)

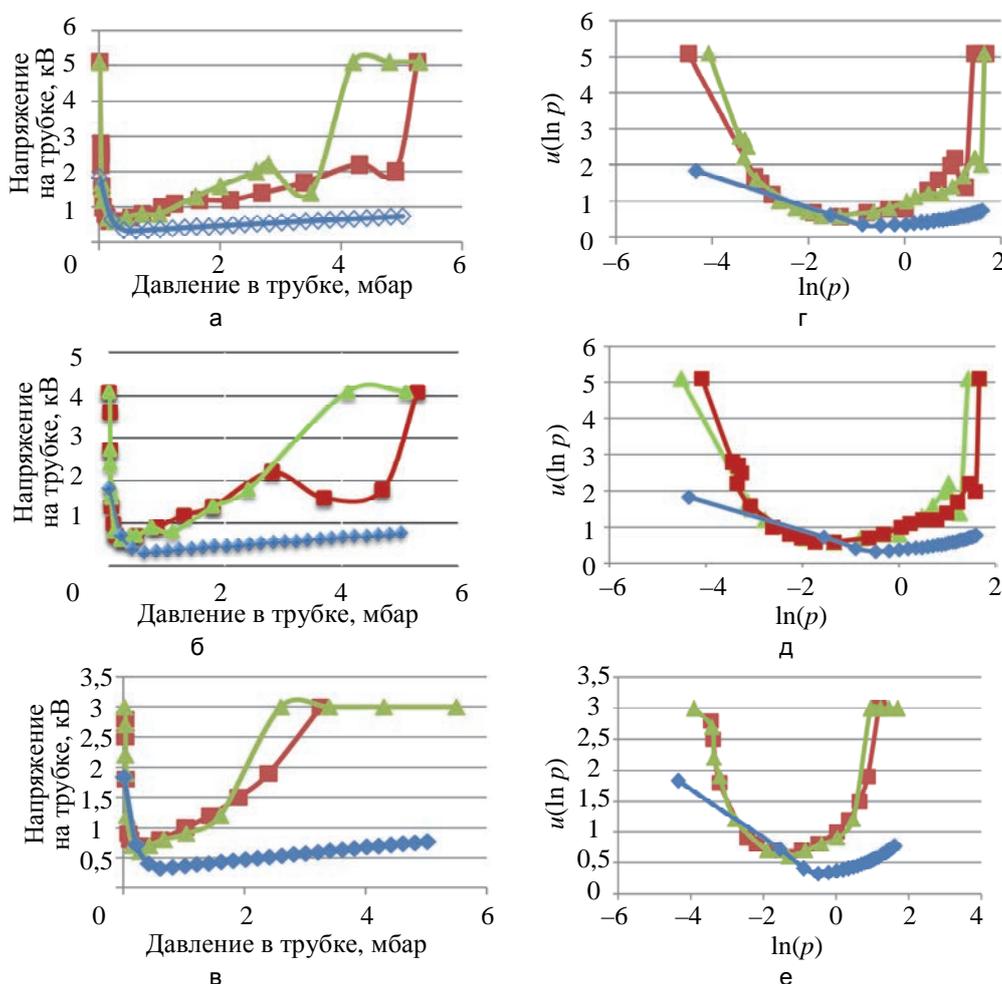


Рис. 2. Результаты измерений зависимости падения напряжения на разрядном промежутке от величины питающего разрядную цепь напряжения и давления воздушной смеси в разрядном промежутке в случаях откачки трубки (треугольные маркеры) и при напуске воздушной смеси (маркеры в виде квадратов) совместно с результатами численного моделирования в рамках полуэмпирического подхода для модельного газа (маркеры в виде ромбов).

Для удобства сопоставления данные приведены в линейном масштабе по оси давлений

(при напряжении питания разрядной цепи 5,1кВ (а); при 4,1кВ (б); при 3 кВ (в)) и логарифмическом (при напряжении питания разрядной цепи 5,1кВ (г); при 4,1кВ (д); при 3 кВ (е)), где $\ln(p)$ – логарифм от давления, а $u(\ln(p))$ – зависимость падения напряжения от логарифма давления

На первом этапе данные измерений сопоставлялись с результатами численного моделирования [24], осуществляемого в рамках простейшего полуаналитического подхода [2, 3], основанного на представлении тлеющего разряда как совокупности двух областей: прикатодной области и положительного столба. Падение напряжения на прикатодной области вычислялось, исходя из требования его минимальности при условии выполнения обобщенного критерия самоподдержания тлеющего разряда с учетом нелинейности зависимости напряженности поля E от расстояния от катода z :

$$\int_0^d \alpha(E(z)) dz = \ln(1 + \gamma^{-1}),$$

где d – толщина прикатодного слоя; α – оцениваемый по эмпирической формуле Таундсена ионизационный коэффициент; γ – параметр, характеризующий вероятность выбивания электрона с катода в результате прихода на него иона [24].

Падение напряжения на положительном столбе определялось по его длине (рис. 3) и напряженности поля, определяемой из требований выполнения условий баланса энергий и числа электронов в этой зоне разряда [2, 3, 24].

При выполнении расчетов использовались приведенные в [2, 3] экспериментальные данные для вероятности выбивания электронов с катода при ионной бомбардировке γ и коэффициента потерь энергии электронов при столкновении с тяжелыми частицами газа δ , входящего в уравнение баланса энергий, связывающее напряженность электрического поля E с электронной температурой T_e :

$$\frac{3}{2} T_e = 0,8 \frac{q_e E}{\sigma \sqrt{\delta} N},$$

где q_e – заряд электрона; σ – транспортное сечение; N – концентрация частиц газа.

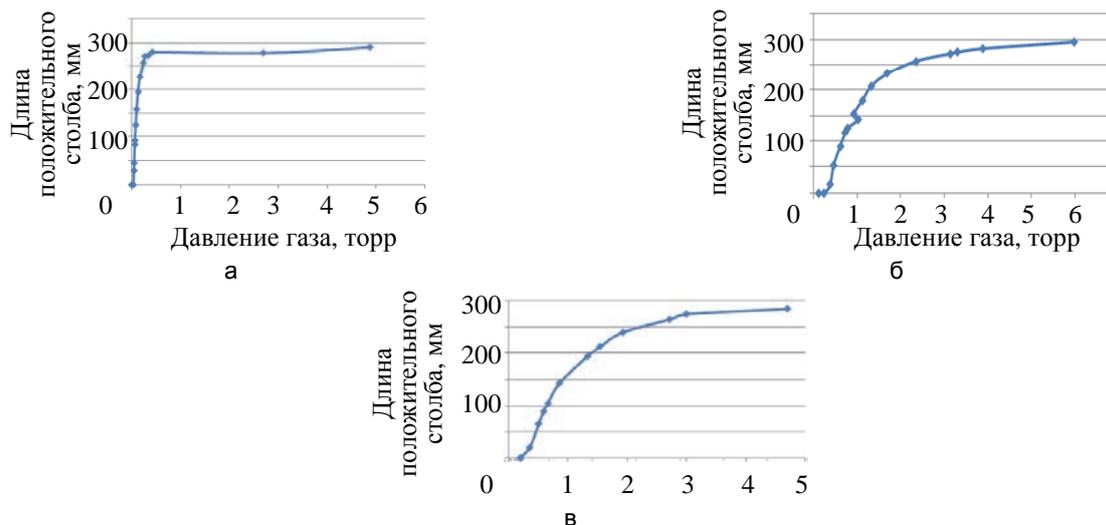


Рис. 3. Зависимость длины положительного столба тлеющего разряда в воздушной смеси от давления газа при различных значениях напряжений, питающих разрядную цепь: $U=5,1$ кВ (а); $U=4,1$ кВ (б); $U=3,0$ кВ (в)

Выполненные описанным образом расчеты приводили к систематически заниженным, по сравнению с данными эксперимента, результатам в области нормального разряда. В режиме аномального разряда соответствие между результатами физического и численного экспериментов можно считать вполне удовлетворительным (рис. 2). Последнее позволяет считать, что в случае разрядов в воздушных смесях при пониженных давлениях полуэмпирическая модель требует уточнений, прежде всего в части, связанной с описанием положительного столба, играющего основную роль в формировании зависимости $u(p)$ в области нормального тлеющего разряда. По-видимому, наиболее эффективным путем решения возникшей задачи является не простое варьирование входящих в полуэмпирическую модель оцениваемых из эксперимента усредненных по большой совокупности элементарных плазменных процессов параметров, а переход к более детализированным численным моделям нелокальной плазмы газовых разрядов, допускающим поэтапное усложнение модели путем введения в рассмотрение отдельных элементарных процессов.

Численное моделирование нелокальной плазмы тлеющего разряда

в рамках гидродинамического подхода

Иерархия поэтапно усложняемых численных моделей тлеющего разряда в воздушной смеси строилась на базе усредненного микроскопического подхода, использующего систему гидродинамических уравнений для концентраций n_j всех включаемых в рассмотрение частиц с зарядами q_j , различающихся между собой как типом α (электроны, атомы, молекулы, ионы), так и их конкретным квантовым состоянием $j = \{ \alpha, \mathbf{p}, n, L, S, J, \dots \}$:

$$\begin{cases} \frac{\partial n_j^{(\Sigma)}}{\partial t} = \sum_{p,q,j'} k_{p+q \rightarrow j+(j')}^{(+)} n_p n_q - \sum_{p,j'} k_{j+p \rightarrow (j')}^{(+)} n_j n_p - (\nabla, \mathbf{J}_j^{(\alpha)}), \\ \mathbf{J}_j^{(\alpha)} = -D_j \nabla n_j^{(\alpha)} + \mu_j q_j n_j^{(\alpha)} \mathbf{E}, \end{cases} \quad (1)$$

где k_{ij} – константы скоростей элементарных процессов, приводящих к изменению импульсов частиц (\mathbf{p}) и состояний атомов и ионов, как правило, характеризуемых следующими квантовыми числами: n – главным, L – полным орбитальным моментом электронного облака, S – полным спином; J – полным моментом импульса и т.д. В системе уравнений (1), помимо процессов рождения и гибели частиц j в результате столкновений, учтены процессы переноса, описываемые их потоками \mathbf{J}_j , возникающими в результате диффузии и дрейфа под действием сил электрического поля (коэффициенты D_j и μ_j соответственно).

Уравнения баланса для числа частиц (1) дополнялись уравнениями для электрического поля: \mathbf{E} вместе с его потенциалом φ :

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi, \quad \Delta \varphi = -4\pi \sum_j q_j n_j \quad (2)$$

а также аналогичными по форме (1) уравнениями баланса для энергий для всех типов частиц j , включаемых в модель. При этом для всех тяжелых частиц (ионов, атомов и молекул в различных квантовых состояниях) предполагались максвелловские распределения по энергиям с температурами, различающимися для нейтральных частиц и ионов. В рамках модели, учитывающей эффекты нелокальности, допускалось нематвелловское распределение электронов по энергиям. В ходе численного решения системы (1)–(2) использовалась двумерная модель газового разряда в цилиндрической трубке, позволяющая корректно учитывать элементарные процессы, происходящие как в разрядном объеме, так и на стенках.

Перечисленные подходы и идеи были реализованы в численных моделях, созданных на базе плазменного модуля среды численного моделирования COMSOL [9] и системы высокопроизводительных вычислений.

В качестве нулевого приближения был выполнен тестовый расчет газового разряда в аргоне для случая разрядной цепи и геометрии разрядного промежутка, соответствующих используемой авторами экспериментальной установке: радиус трубки 15 мм, расстояние между электродами 500 мм, электроды дисковые, практически перекрывающие все поперечное сечение трубки. Напряжение питания разрядной цепи, состоящей из последовательно соединенных разрядного промежутка и балластного сопротивления 5 МОм, составляло 5,1, 4,4 и 3,0 кВ. Температура газа нейтральных частиц принималась равной 293 К.

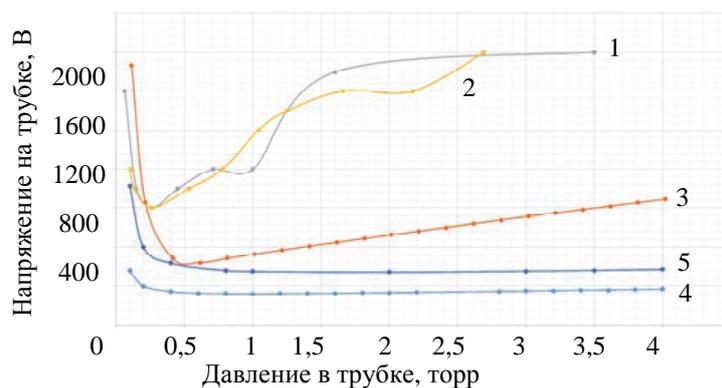
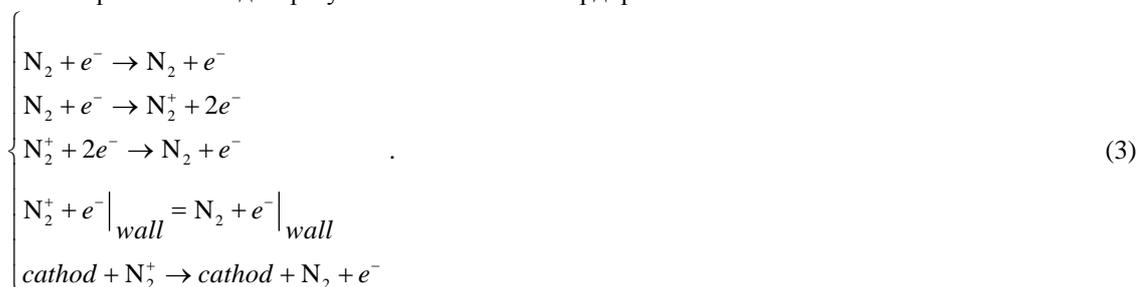


Рис. 4. Сопоставление результатов измерений электрических параметров тлеющего разряда в воздушной смеси (1 – при напуске газа, 2 – при откачке) с результатами, полученными в рамках полуаналитической модели (3) и численных гидродинамических микромоделей разряда в аргоне (4) и модельном одноатомном газе (5)

Использовалась предложенная в [9] плазмохимическая модель аргоновой плазмы, включающая процессы прямой и ступенчатой ионизации атомов при электронном ударе, пеннинговскую ионизацию при столкновениях двух возбужденных атомов, столкновительное девозбуждение и гибель ионов в результате рекомбинации на стенках разрядной трубки. Частичным оправданием использования модели аргоновой плазмы для настройки модели тлеющего разряда в воздушной смеси явилась близость значений энергии ионизации аргона и молекул основных газов, составляющих атмосферу – азота и кислорода. Это

случайное совпадение в свое время сделало популярным использование относительно простого для изучения разряда в атмосфере аргона для грубых оценок параметров воздушных разрядов (см., например, [35]). Как и ожидалось, количественное соответствие с экспериментом результатов, полученных с помощью такой модели (кривая 4 на рис. 4), оказалось существенно худшим, чем в случае использования полуаналитической модели для воздуха [24]. Попытки улучшить соответствие путем приближения исходной гидродинамической модели аргонового разряда к воздушному, исключением из учитываемых в аналитической модели процессов ступенчатой ионизации и корректировкой коэффициента энергетических потерь при столкновениях электронов с атомами привели лишь к не слишком значительному сближению результатов микромоделирования в рамках простейших плазмохимических моделей, учитывающих прямую ионизацию при электронном ударе, вторичную эмиссию электронов с катода и рекомбинацию на стенках трубки (кривые 4 и 5 на рис. 4), с расчетами по полуаналитической модели [2, 3] (кривая 3) и экспериментом (кривые 1, 2).

Переход к корректной плазмохимической модели разряда в воздушной смеси, требующей весьма ресурсоемких вычислений, производился поэтапно. На первом этапе была учтена совокупность процессов в молекулярном азоте, аналогичная использовавшейся в случае модельного воздухоподобного одноатомного газа. Модель включала упругие столкновения электронов с молекулами, процессы столкновительной ионизации молекул из основного состояния, рекомбинацию в объеме и на стенках трубки и эмиссию электронов с катода в результате ионной бомбардировки:



Использовались собранные в [13–15] значения сечений и (или) констант скоростей элементарных процессов, параметр γ для последней из реакции был выбран равным 0,005.

В этом варианте модели не учитывался важный для разрядов в молекулярных газах канал потери энергии электронами при столкновении с молекулами в результате возбуждения колебательных степеней свободы последних. Как и следовало ожидать, это привело к существенному завышению электронной температуры и, следовательно, скорости ионизации, концентрации электронов и проводимости разрядного промежутка (кривая 3 на рис. 5).

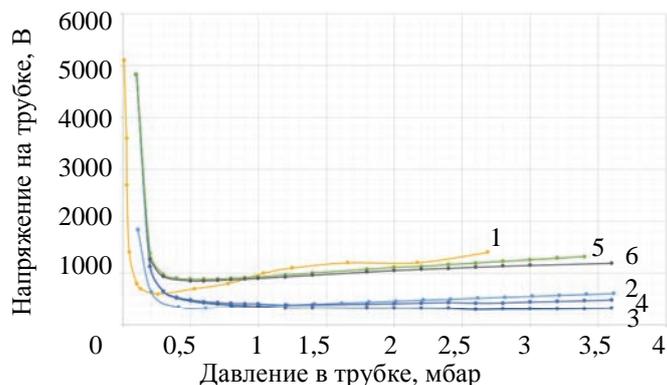


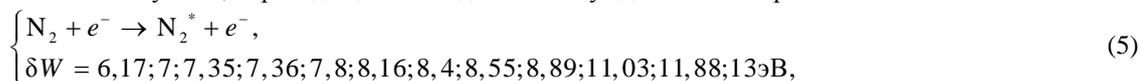
Рис. 5. Результаты расчетов зависимости от давления величины падения напряжения на разрядном промежутке для различных плазмохимических моделей нелокальной плазмы: 1 – эксперимент; 2 – полуаналитическая модель; 3 – учет в рамках гидродинамической модели совокупности реакций (3); 4 – учет реакций (3) совместно с возбуждением колебаний и вращений молекул (4); 5 – дополнительный учет неупругих столкновений (5), приводящий к электронному возбуждению молекул; 6 – модель, учитывающая всю совокупность процессов (3)–(6) для разряда в смеси азота и кислорода

Учет в рамках плазмохимической модели (3) эффектов охлаждения электронного газа за счет частичного превращения кинетической энергии электронов в энергию колебаний и вращений двухатомных молекул



привел к некоторому уменьшению проводимости разрядного промежутка и увеличению падения напряжения на нем (кривая 4 на рис. 5). В компьютерную модель были включены процессы возбуждения первых 8 колебательных и первого возбужденного вращательного состояния молекулы. Учет процессов передачи энергии электронов на возбуждение более высоких колебательных и вращательных подуровней молекул был признан бесперспективным из-за быстрого ослабления влияния подобных реакций на вид рассчитываемой зависимости $u(p)$.

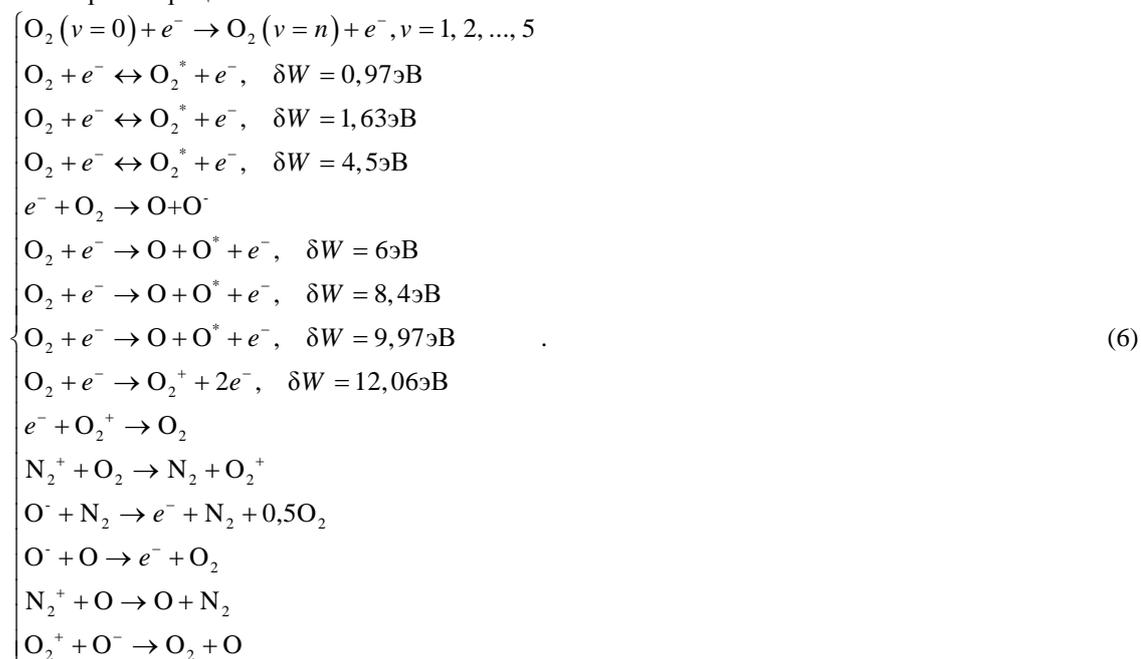
Менее ожидаемым было заметное улучшение соответствия результатов численного моделирования эксперименту (кривая 5 на рис. 5) после включения в модель процессов неупругих столкновений электронов с молекулами, переводящих последние в возбужденные электронные состояния:



где δW – энергия возбуждения молекулы.

Улучшающий качество модели газоразрядной плазмы эффект, по-видимому, также обусловлен снижением проводимости разрядного промежутка из-за приводящей к охлаждению электронного газа передачи электронами энергии молекулам. Несмотря на то, что подобные (5) корректировки плазменной модели используются многими авторами, к таким расширениям плазмохимических моделей следует относиться с осторожностью. Учет одних только процессов заселения возбужденных электронных состояний молекул делает модель плазмы газового разряда незамкнутой. Отсутствие в модели каналов, обеспечивающих уход молекул из таких состояний, может приводить к таким физически бессмысленным эффектам, как, например, неограниченное возрастание населенностей возбужденных уровней. Кроме того, введение в рассмотрение возбужденных состояний, строго говоря, должно сопровождаться включением в модель процессов ступенчатой ионизации, учет которой должен увеличивать проводимость плазмы и ослаблять эффект роста падения напряжения на разрядном промежутке. Подробный анализ перечисленных процессов, сопутствующих учету возбуждения молекул, является естественным направлением дальнейшего развития работ авторов по развитию и верификации методов моделирования воздушных разрядов.

Последующим шагом на пути развития компьютерной модели является переход от моделирования разряда в чистом азоте к смеси азота с кислородом в пропорции 7:3, соответствующей атмосферному воздуху. При этом плазмохимическая модель существенно усложнилась из-за включения в нее следующих элементарных процессов:



Описанное расширение модели привело к возрастанию трудоемкости расчетов и столь существенному увеличению времени последних, что возникал вопрос об их целесообразности по сравнению с прямым экспериментальным исследованием. Уменьшения времени численного моделирования удалось добиться за счет следующих процедур:

- использование в качестве стартового (нулевого) приближения для расчетов в рамках новых (усложненных) плазмохимических моделей результатов численного моделирования, полученных в рамках предшествующих (родительских) моделей газоразрядной плазмы;

- выбор оптимальной сетки для решения систем гидродинамических уравнений, обеспечивающей достаточную для прикладных задач точность расчета при минимальном числе элементов, обеспечивающем разумное время выполнения расчетов;
- использование максимально сглаженных функций, описывающих геометрию разрядного объема и форму электродов, с целью улучшения сходимости промежуточных итерационных процедур в приграничных пространственно-временных областях.

Полученная в рамках модели, описываемой уравнениями (3)–(6), зависимость $i(p)$ (кривая б на рис. 5) наилучшим образом соответствует экспериментальной. Следует отметить, что включение в плазмохимическую модель кислорода и элементарных процессов с его участием существенно изменяет внутренние параметры разряда. Например, учет дополнительного газа (O_2), молекулы которого имеют меньший потенциал ионизации по сравнению с основной компонентой (N_2), существенно влияет на концентрацию ионов последнего (рис. 6). Указанный факт имеет косвенные экспериментальные подтверждения в спектроскопических исследованиях излучения разрядов в смесях инертных газов, но в рассматриваемом случае, по-видимому, требует отдельной экспериментальной проверки.

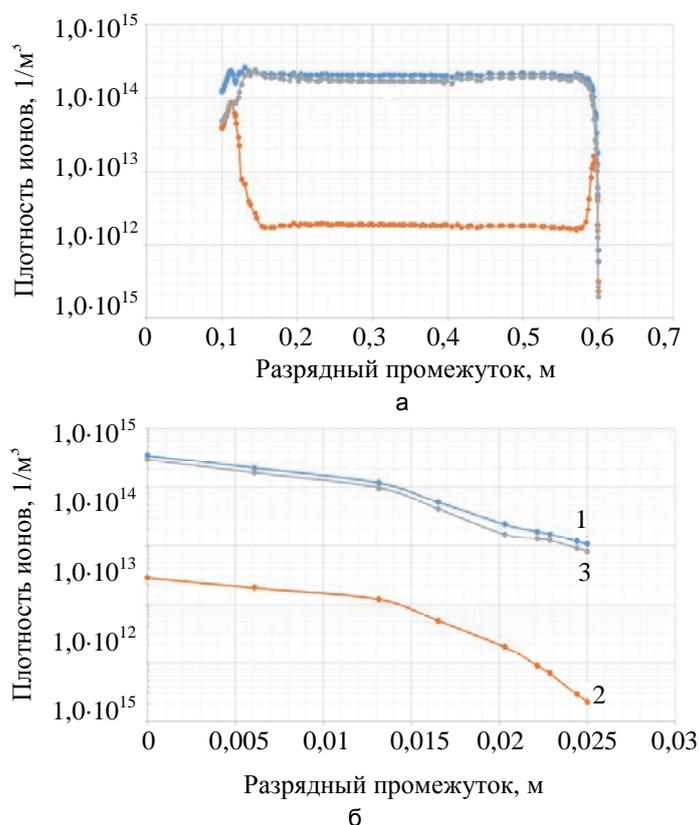


Рис. 6. Изменение продольных (а) и поперечных (б) профилей концентрации ионов основной компоненты воздушной смеси (N_2) при учете элементарных процессов с участием кислорода: кривые 1 – концентрации N_2^+ в разряде в чистом азоте; кривые 2 – концентрации N_2^+ в разряде в воздухоподобной смеси с 30% добавкой кислорода; кривые 3 – концентрации O_2^+ в разряде в воздухоподобной смеси

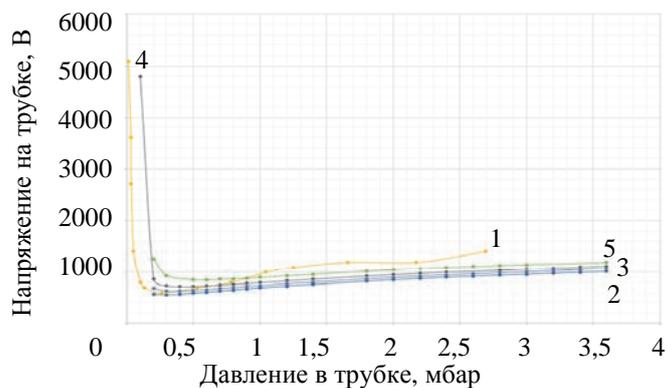


Рис. 7. Результаты варьирования коэффициента вторичной электронной эмиссии с катода при расчетах зависимости $u(p)$ в рамках модели (3)–(6); кривая 1 – данные эксперимента; кривая 2 – $\gamma = 0,1$; кривая 3 – $\gamma = 0,05$; кривая 4 – $\gamma = 0,02$; кривая 5 – $\gamma = 0,01$

Необходимо принять во внимание наличие в учитывающей всю совокупность процессов (3)–(6) модели ряда параметров, использованные значения для которых не могут рассматриваться как надежные. В ходе численного моделирования оправдано варьирование таких параметров с целью уточнения их значений, обеспечивающих наилучшее совпадение результатов моделирования с экспериментальными полученными зависимостями для характеристик разряда, допускающих надежную опытную регистрацию. В рассматриваемом случае к таким подлежащим уточнению «скрытым» параметрам, прежде всего, относится коэффициент вторичной эмиссии электронов с катода γ . Его величина может сильно изменяться в зависимости от реального состава газовой смеси в разрядной ячейке, состояния поверхности катода и ее загрязнения. На рис. 7 приведены результаты такого варьирования, в результате которого значение коэффициента было выбрано равным $\gamma = 0,02$.

Проверка работоспособности модели (3)–(6), настраиваемой в ходе сравнения ее результатов с экспериментом для питающего напряжения разрядной цепи $U_1 = 5,1$ кВ, осуществлялась в результате сравнения расчетных зависимостей с экспериментальными для напряжений $U_2 = 4,1$ кВ и $U_3 = 3,0$ кВ (рис. 8). Для контрольных экспериментов соответствие модели результатам измерений сохранилось на прежнем уровне. Следует отметить, что в области давлений, не превосходящих торр, и окончательная численная модель, и эксперимент демонстрируют весьма слабые различия в зависимостях $u(p)$, получаемых для различных напряжений питания разрядной цепи. Этот результат вполне ожидаем и связан с известными эффектами самоорганизации плазмы тлеющего разряда в реализованных в наших условиях режимах. В области больших давлений разряд оказывался существенно нестабильным и имел неустойчивую сложную пространственную структуру. Указанные эффекты, очевидно, не могли быть воспроизведены в численной модели не только из-за предположения об идеальной аксиальной симметрии электродов и трубки, но и в силу двумерного приближения, используемого в самой модели. Вместе с тем обращает на себя внимание систематическое занижение скорости роста теоретической зависимости падения напряжения от давления в области нормального разряда по сравнению с экспериментом. По мнению авторов, это расхождение может быть отнесено за счет неучтенных в модели (3)–(6), но присутствующих в воздушном разряде элементарных процессов, приводящих к уменьшению средней энергии электронов. К их числу, например, могут относиться неупругие столкновения электронов с молекулами воды, сопровождающиеся возбуждением различных колебательных мод молекулы.

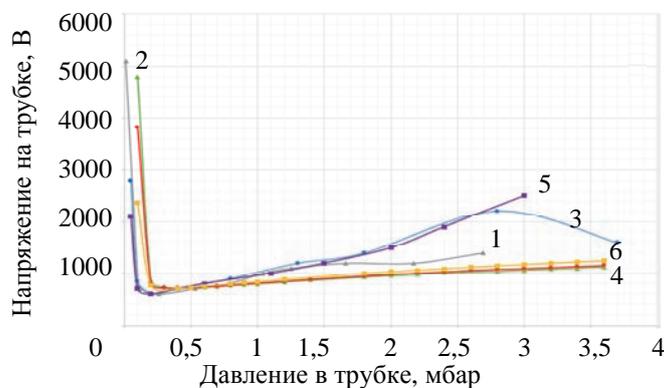


Рис. 8. Сопоставление экспериментально полученных зависимостей $u(p)$ с результатами численного моделирования с учетом реакций (3)–(6) при уточненном значении $\gamma = 0,02$: кривые 1 и 2 – эксперимент и результаты моделирования при $U_1 = 5,1$ кВ; кривые 3 и 4 – эксперимент и результаты моделирования при $U_2 = 4,1$ кВ; кривые 5 и 6 – эксперимент и результаты моделирования при $U_3 = 3,0$ кВ

Заключение

Настроенные по удобным для экспериментальных измерений зависимостям численные модели нелокальной плазмы тлеющих разрядов позволяют получать информацию о внутренних параметрах этих разрядов, необходимую для приложений и уточнения, удобных для практики полуаналитических моделей, экспериментальное определение которых затруднено по физическим и (или) техническим причинам. В качестве примера на рис. 9 приведены продольные и радиальные профили распределения потенциала и концентраций электронов и ионов в разрядах при различных питающих разрядную цепь напряжениях, на рис. 10 – соответствующие двумерные распределения. Планируемые экспериментальные измерения этих (или связанных с ними) величин, очевидно, будут использоваться в качестве дополнительных тестов качества построенной модели и источника информации и для ее уточнения. Так, построенные уточненные модели газовых разрядов в воздушных смесях при пониженных давлениях рассматриваются как необходимый этап на пути использования численного моделирования для исследований и выбора оптимальных

параметров для практически важных атмосферных микроразрядов, экспериментальная диагностика большинства параметров которых оказывается весьма сложной.

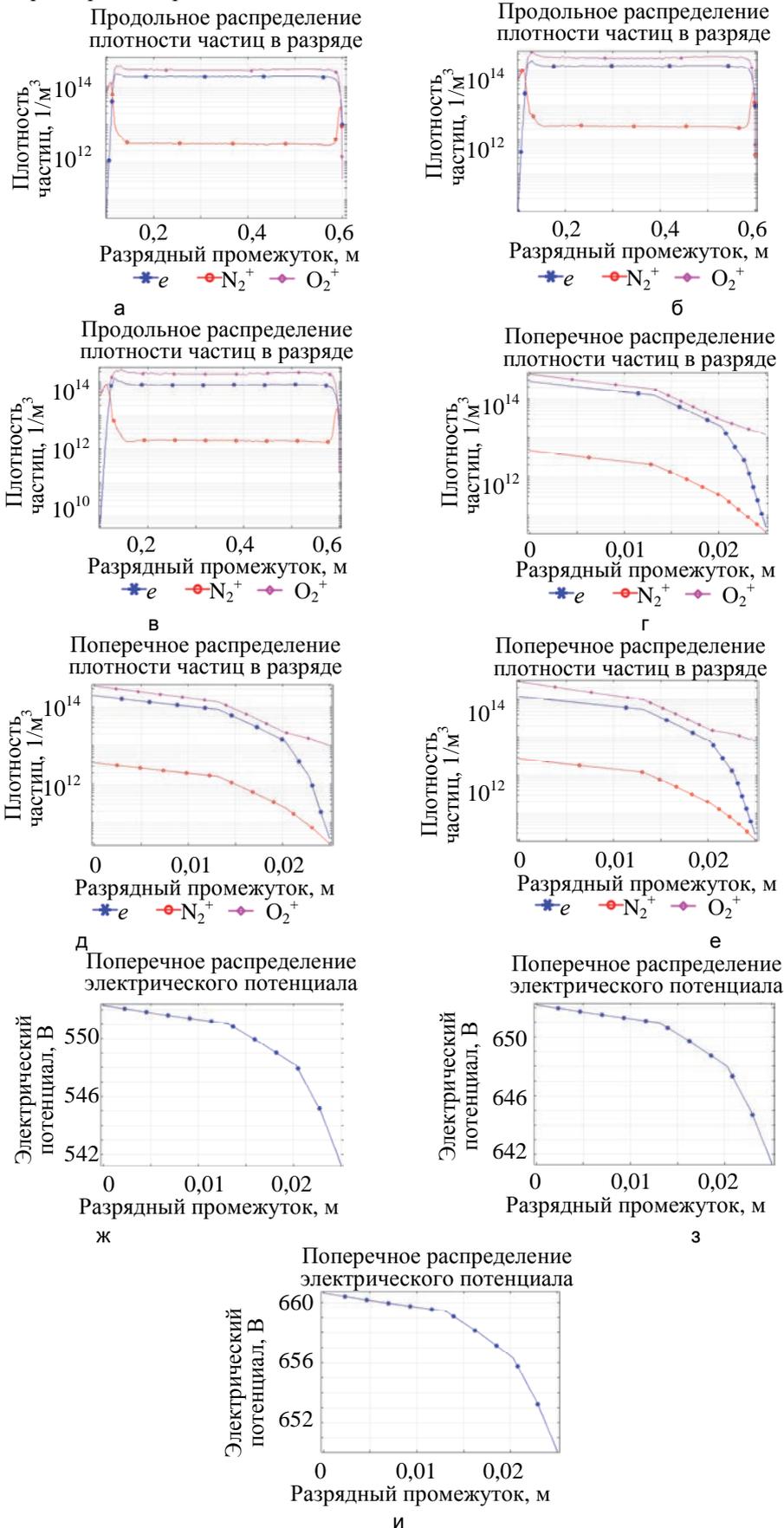


Рис. 9. Внутренние параметры газового разряда в воздушной смеси при пониженных давлениях, полученные в рамках модели (3)–(6) при напряжениях 5,1 кВ, 4,1 кВ и 3 кВ: продольное распределение плотности частиц в разряде (а)–(в); поперечное сечение (г)–(е); поперечное распределение электрического потенциала (ж)–(и)

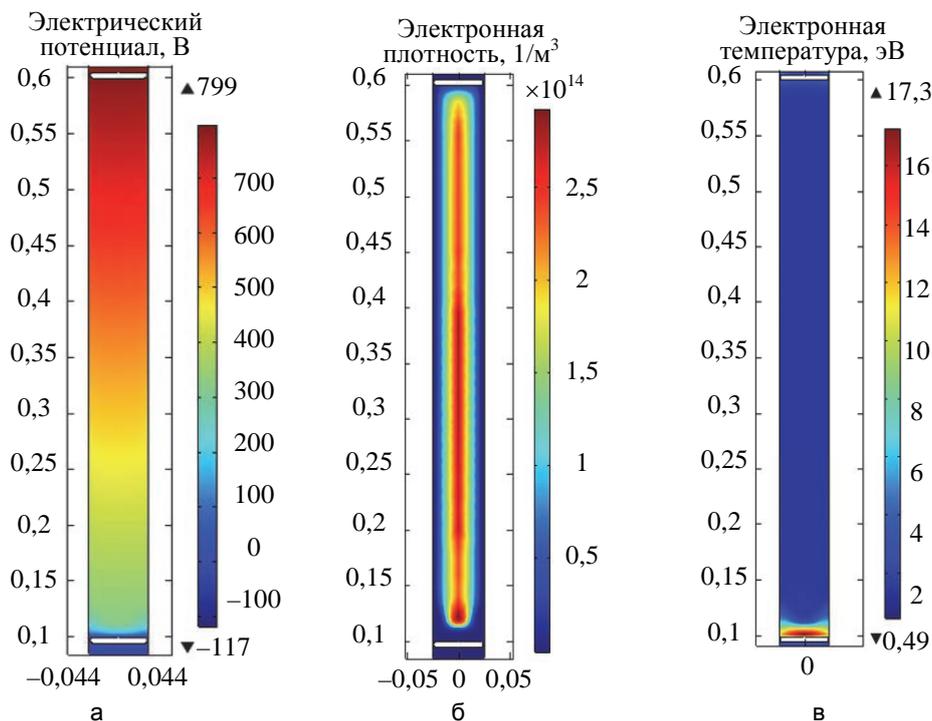


Рис. 10. Примеры двумерных распределений внутренних параметров разряда: электрического потенциала (а); концентрации (б), электронной температуры (в)

Дополнительных замечаний требует использованная процедура варьирования значений «скрытых» параметров численной модели разряда. Помимо коэффициента γ , к таким параметрам могут быть отнесены ионная температура, подвижность частиц и другие. В нашем случае оказался весьма существенным выбор начального приближения для распределения концентрации электронов: в случае «неудачных» значений итерационная процедура решения уравнений (1)–(2) переставала сходиться к стационарному решению. В этой связи представляется актуальной задача построения алгоритма и создания соответствующего интерактивного программного приложения, обеспечивающего рациональный поиск оптимальных для рассматриваемого разряда наборов скрытых параметров плазмы и нулевых приближений для итерационных процедур. Работа в указанном направлении уже начата.

Литература

1. Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д. Физика тлеющего разряда. СПб.: Лань, 2010. 512 с.
2. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 490 с.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, Физматлит, 1987. 592 с.
4. Богданов Е.А., Капустин К.Д., Кудрявцев А.А., Чирцов А.С. Сопоставление различных вариантов гидродинамического (fluid) моделирования продольной структуры микрозаряда атмосферного давления в гелии // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 10. С. 41–53.
5. Kapustin K., Kudryavtsev A., Bogdanov E., Chirtsov A. Nonlocal behavior of electron fluxes and excitation rates for “local” EEDF in moderate and high pressures DC positive column plasmas // IEEE Transactions on Plasma Science. 2011. V. 39. N 11. P. 2580–2581. doi: 10.1109/TPS.2011.2140385
6. Елисеев С. И., Демидов В. И., Кудрявцев А. А., Колобов В. И., Богданов Е.А., Чирцов А.С. Моделирование импульсного пробоя в гелии с использованием адаптивных методов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 5(93). С. 139–146.
7. Bogdanov E.A., Chirtsov A.S., Kudryavtsev A.A.

References

1. Kudryavtsev A.A., Smirnov A.S., Tsendin L.D. *Fizika Tleyushchego Razryada* [Physics of Glow Discharge]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2010, 512 p.
2. Granovskii V.L. *Elektricheskii Tok v Gaze. Ustanovivshisya Tok* [Electric Current in the Gas. Sustained Current]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 490 p.
3. Raizer Yu.P. *Fizika Gazovogo Razryada* [Gas Discharge Physics]. Moscow, Nauka Publ., Fizmatlit Publ., 1987, 592 p.
4. Bogdanov E.A., Kapustin K.D., Kudryavtsev A.A., Chirtsov A.S. Different approaches to fluid simulation of the longitudinal structure of the atmospheric-pressure microdischarge in helium. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 55, no. 10, pp. 1430–1442. doi: 10.1134/S1063784210100063
5. Kapustin K., Kudryavtsev A., Bogdanov E., Chirtsov A. Nonlocal behavior of electron fluxes and excitation rates for “local” EEDF in moderate and high pressures DC positive column plasmas. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, vol. 39, no. 11, pp. 2580–2581. doi: 10.1109/TPS.2011.2140385
6. Eliseev S.I., Demidov V.I., Chirtsov A.S., Kudryavtsev A.A., Kolobov V.I., Bogdanov E.A. Simulation of pulsed breakdown in helium by adaptive methods. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics*

- Fundamental nonambipolarity of electron fluxes in 2D plasmas // *Physical Review Letters*. 2011. V. 106. N 19. Art. 195001. doi: 10.1103/PhysRevLett.106.195001
8. Kaganovich I.D., Demidov V.I., Adams S.F. and Raitses Y. Non-local collisionless and collisional electron transport in low-temperature plasma // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2009. V. 51. N 12. Art. 124003. doi: 10.1088/0741-3335/51/12/124003
 9. Comsol introduction. Humusoft [Электронный ресурс]. URL: www.humusoft.com/comsol (дата обращения 30.08.2016).
 10. Ashihara O. The electron energy loss rates by polar molecules // Institute of Space and Aeronautical Science, Tokyo. 1975. V. 40. N 530. P. 257.
 11. Dalidchik F.I., Sayasov Yu.S. Recombination of electrons in molecular gases // *Journal of Experimental and Theoretic Physics*. 1965. V. 49. P. 302–305.
 12. Rudge M.R.H. Theory of ionization of atoms by electron impact // *Reviews of Modern Physics*. 1968. V. 40. P. 564. doi: 10.1103/RevModPhys.40.564
 13. Biagi Database. Plasma Data Exchange Project [Электронный ресурс]. URL: www.lxcat.net/Biagi (дата обращения 22.04.2016).
 14. Morgan (Kinema Research & Software) Database [Электронный ресурс]. URL: www.lxcat.net/Morgan (дата обращения 22.04.2016).
 15. Phelps Database IST-Lisbon Database [Электронный ресурс]. URL: www.lxcat.net/Phelps (дата обращения 22.04.2016).
 16. Вайнштейн Л.А., Собельман И.И., Юков Е.А. Сечения возбуждения атомов и ионов электронами. М.: Наука, 1973. 142 с.
 17. Фок В.А. Начала квантовой механики. М.: Наука, 1976. 376 с.
 18. Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. М.: Физматгиз, 1963, 640 с.
 19. Sychov S., Chirtsov A. Genetic algorithm as a means for solving a radial Schrödinger equations system // *Proc. XIX Int. Conf. on Soft Calculations and Measurements*. St. Petersburg, 2003. P. 489–492.
 20. Тухватулин А.И., Сысолятина Е.В., Щербляков Д.В. и др. Низкотемпературная плазма вызывает р53-зависимый апоптоз клеток карциномы кишечника // *Acta Naturae*. 2012. Т. 4. № 3. С. 87–92.
 21. Стройкова И.К., Максимов А.И. Обеззараживание растворов тлеющим и диафрагменным разрядами атмосферного давления // *Электронная обработка материалов*. 2002. Т. 38. №6. С. 43–49.
 22. Калинин Н.Г., Бошкова И.Л., Панченко Г.И., Коломийчук С.Г. Влияние низкочастотного и высокочастотного электромагнитного поля на семена // *Биофизика*. 2005. Т. 50. №2. С. 361–366.
 23. Кудрявцев А.А., Мустафаев А.С., Цыганов А.Б., Чирцов А.С., Яковлева В.И. Спектры энергии электронов в гелии, наблюдаемые в микроплазменном детекторе CES // *ЖТФ*. 2012. Т. 82. № 10. С. 1–6.
 24. DeJoseph Jr., C.A., Demidov V.I., Kudryavtsev A.A. Nonlocal effects in a bounded low-temperature plasmas with fast electrons // *Physics of Plasmas*. 2007. V. 14. N 5. Art. 057101. doi: 10.1063/1.2436470
 25. Bogdanov E.A., Kudryavtsev A.A., Ochikova Z.S. Main scenarios of spatial distribution of charged and neutral components in SF6 plasma // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2013. V. 41. N 12. P. 3254–3267. doi: 10.1109/TPS.2013.2278839
 26. Walker J.J., Koepke M.E., Zimmerman M.I., Farrell W.M., Demidov V.I. Analytical model for gyro-phase drift arising from abrupt inhomogeneity // *Journal of Plasma Physics*. 2014. V. 80. N 3. P. 395–404. doi: 10.1017/S0022377813001359
 27. Bogdanov E.A., Demidov V.I., Kaganovich I.D., Koepke M.E., Kudryavtsev A.A. Modeling a short DC discharge with thermionic cathode and auxiliary anode // *Physics of Plasmas*. 2013. V. 20. N 10. Art. 101605. doi: 10.1063/1.4823464
 28. Koepke M.E., Walker J.J., Zimmerman M.I., Farrell W.M., Demidov V.I. Signature of gyro-phase drift // *Journal of Plasma Physics*. 2013. V. 79. N 6. P. 1099–1105. doi: 10.1017/S0022377813001128
 7. Bogdanov E.A., Chirtsov A.S., Kudryavtsev A.A. Fundamental nonambipolarity of electron fluxes in 2D plasmas. *Physical Review Letters*, 2011, vol. 106, no. 19, art. 195001. doi: 10.1103/PhysRevLett.106.195001
 8. Kaganovich I.D., Demidov V.I., Adams S.F. Raitses Y. Non-local collisionless and collisional electron transport in low-temperature plasma. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2009, vol. 51, no. 12, art. 124003. doi: 10.1088/0741-3335/51/12/124003
 9. *Comsol introduction*. Humusoft. Available at: www.humusoft.com/comsol (accessed 30.08.2016).
 10. Ashihara O. *The electron energy loss rates by polar molecules*. Tokyo, Institute of Space and Aeronautical Science, 1975, vol. 40, no. 530, pp. 257.
 11. Dalidchik F.I., Sayasov Yu.S. Recombination of electrons in molecular gases. *Journal of Experimental and Theoretic Physics*, 1965, vol. 49, pp. 302–305.
 12. Rudge M.R.H. Theory of ionization of atoms by electron impact. *Reviews of Modern Physics*, 1968, vol. 40, pp. 564. doi: 10.1103/RevModPhys.40.564
 13. *Biagi Database. Plasma Data Exchange Project*. Available at: www.lxcat.net/Biagi (accessed 22.04.2016).
 14. *Morgan (Kinema Research & Software) Database*. Available at: www.lxcat.net/Morgan (accessed 22.04.2016).
 15. *Phelps Database IST-Lisbon Database*. Available at: www.lxcat.net/Phelps (accessed 22.04.2016).
 16. Vainshtein L.A., Sobel'man I.I., Yukov E.A. *Secheniya Vozbuzhdeniya Atomov i Ionov Elektronami* [Excitation Cross Sections of Atoms and Ions by Electrons]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 142 p.
 17. Fok V.A. *Nachala Kvantovoi Mekhaniki* [Principles of Quantum Mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 376 p.
 18. Sobel'man I.I. *Vvedenie v Teoriyu Atomnykh Spektrov* [Introduction to the Theory of Atomic Spectra]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, 640 p.
 19. Sychov S., Chirtsov A. Genetic algorithm as a means for solving a radial Schrödinger equations system. *Proc. XIX Int. Conf. on Soft Calculations and Measurements*. St.-Petersburg, 2003, pp. 489–492.
 20. Tuhvatulin A.I., Sysolyatina E.V., Scheblyakov D.V. et. al. Non-thermal plasma causes P53-depended apoptosis in human colon carcinoma cells. *Acta Naturae*, 2012, vol. 4, no. 3, pp. 82–87.
 21. Stroikova I.K., Maksimov A.I. Disinfecting of solutions by glow and diaphragm discharges at atmospheric pressure. *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 43–49. (In Russian)
 22. Kalinin L.G., Panchenko G.I., Boshkova I.L., Kolomiichuk S.G. Influence of low-frequency and microwave electromagnetic fields on seeds. *Biophysics*, 2005, vol. 50, no. 2, pp. 334–337.
 23. Kudryavtsev A.A., Chirtsov A.S., Yakovleva V.I., Mustafaev A.S., Tsyganov A.B. Electron energy spectra in helium observed in a microplasma collisional electron spectroscopy detector. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 57, no. 10, pp. 1325–1330. doi: 10.1134/S1063784212100106
 24. DeJoseph Jr., C.A., Demidov V.I., Kudryavtsev A.A. Nonlocal effects in a bounded low-temperature plasmas with fast electrons. *Physics of Plasmas*, 2007, vol. 14, no. 5, art. 057101. doi: 10.1063/1.2436470
 25. Bogdanov E.A., Kudryavtsev A.A., Ochikova Z.S. Main scenarios of spatial distribution of charged and neutral components in SF6 plasma. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, vol. 41, no. 12, pp. 3254–3267. doi: 10.1109/TPS.2013.2278839
 26. Walker J.J., Koepke M.E., Zimmerman M.I., Farrell W.M., Demidov V.I. Analytical model for gyro-phase drift arising from abrupt inhomogeneity. *Journal of Plasma Physics*, 2014, vol. 80, no. 3, pp. 395–404. doi: 10.1017/S0022377813001359
 27. Bogdanov E.A., Demidov V.I., Kaganovich I.D., Koepke M.E., Kudryavtsev A.A. Modeling a short DC discharge with thermionic cathode and auxiliary anode. *Physics of Plasmas*, 2013, vol. 20, no. 10, art. 101605. doi: 10.1063/1.4823464
 27. Bogdanov E.A., Demidov V.I., Kaganovich I.D., Koepke M.E., Kudryavtsev A.A. Modeling a short DC discharge with thermionic cathode and auxiliary anode. *Physics of Plasmas*, 2013, vol. 20, no. 10, art. 101605. doi: 10.1063/1.4823464

29. Astafiev A.M., Gutsev S.A., Kudryavtsev A.A. Study of the discharge with an electrolytic electrode (Gatchina's discharge) // Вестник СПбГУ. Серия 4. Физика. Химия. 2013. № 4. С. 139–142.
30. Барзилович К.А., Богданов Е.А., Кудрявцев А.А. Критерий обращения поля в коротком тлеющем разряде и его зависимость от параметров используемой гидродинамической модели // ПЖТФ. 2014. Т. 40. №13. С. 88–94.
31. Bogdanov E.A., Demidov V.I., Kudryavtsev A.A., Saifutdinov A.I. Is the negative glow plasma of a direct current glow discharge negatively charged? // Physics of Plasmas. 2015. V. 22. N 2. Art. 024501. doi: 10.1063/1.4907192
32. Богданов Е.А., Кудрявцев А.А., Очицова З.Н., Чирцов А.С. Нарушение распределения Больцмана для плотности электронов плазмы в двухкамерных ИСР-разрядах // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 10. С. 155–158.
33. Chen Z., Yin Z., Huang Y., Stepanova O.M., Gutsev S.A., Kudryavtsev A.A. More efficient microwave argon plasma jet with a symmetric hairpin copper wire at atmospheric pressure // IEEE Transactions on Plasma Science. 2015. V. 43. N 3. P. 906–907. doi: 10.1109/TPS.2015.2393552
34. Чернышева М.В., Марек В.П., Чирцов А.С., Швагер Д.А. Компьютерное моделирование при изучении физических процессов в тлеющем разряде в воздушных смесях при низких давлениях // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. №3 (91). С. 140–148.
35. Райзер Ю.П. Высокочастотный индукционных разряд высокого давления и безэлектродный плазматрон // УФН. 1969. Т. 99. С. 687–712.
28. Koepke M.E., Walker J.J., Zimmerman M.I., Farrell W.M., Demidov V.I. Signature of gyro-phase drift. *Journal of Plasma Physics*, 2013, vol. 79, no. 6, pp. 1099–1105. doi: 10.1017/S0022377813001128
29. Astafiev A.M., Gutsev S.A., Kudryavtsev A.A. Study of the discharge with an electrolytic electrode (Gatchina's discharge). *Vestnik St. Petersburg State University. Ser. 4. Phys. Chem*, 2013, no. 4, pp. 139–142.
30. Barzilovich K.A., Bogdanov E.A., Kudryavtsev A.A. A criterion of field reversal in a short glow discharge and its dependence on the parameters of the fluid model used. *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40, no. 7, pp. 581–583. doi: 10.1134/S1063785014070025
31. Bogdanov E.A., Demidov V.I., Kudryavtsev A.A., Saifutdinov A.I. Is the negative glow plasma of a direct current glow discharge negatively charged? *Physics of Plasmas*, 2015, vol. 22, no. 2, art. 024501. doi: 10.1063/1.4907192
32. Bogdanov E.A., Kudryavtsev A.A., Ochikova Z.S., Chirtsov A.S. Violation of the boltzmann distribution for plasma electron number density in two-chamber inductively coupled plasma discharges. *Technical Physics*, 2015, vol. 60, no. 10, pp. 1570–1573. doi: 10.1134/S1063784215100084
33. Chen Z., Yin Z., Huang Y., Stepanova O.M., Gutsev S.A., Kudryavtsev A.A. More efficient microwave argon plasma jet with a symmetric hairpin copper wire at atmospheric pressure. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, vol. 43, no. 3, pp. 906–907. doi: 10.1109/TPS.2015.2393552
34. Tchernycheva M.V., Marek V.P., Chirtsov A.S., Shvager D.A. Computational modeling in the study of glow discharge physical processes in the air at low pressures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 3, pp. 140–148. (In Russian)
35. Raizer Yu.P. High-frequency high-pressure induction discharge and the electrodeless plasmotron. *Soviet Physics Uspekhi*, 1970, vol. 12, pp. 777–791. doi: 10.1070/PU1970v012n06ABEH003972

Авторы

Чернышева Мария Владимировна – работник-исследователь 1-го класса, Институт фундаментальной электроники, Париж, 91405, Франция, Maria.Tchernycheva@ief.u-psud.fr

Чирцов Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация, alex_chirtsov@mail.ru

Швагер Данила Александрович – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, shvagerdanila@gmail.com

Authors

Maria V. Tchernycheva – Chargé de recherche CNRS 1 classe, PhD, Institut d'Electronique Fondamentale, Paris, 91405, France, Maria.Tchernycheva@ief.u-psud.fr

Alexander S. Chirtsov – PhD, Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russia; Professor, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation, alex_chirtsov@mail.ru

Danila A. Shvager – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russia, shvagerdanila@gmail.com