

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ*

П.Р. Савватимова

poli.savvatimova@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Рассмотрен элемент иерархии радиационно-плазмодинамических математических моделей, которые предназначены для исследования импульсных электроразрядных источников различного класса. С помощью расчетных исследований получены данные о радиационно-плазмодинамических процессах и явлениях в импульсных эрозионных электроразрядных источниках ультрафиолетового излучения и ударных волн различного типа. В настоящей работе рассмотрены в основном открытые неограниченные и поверхностные разряды. Посвящена она, в том числе, учету магнитного поля — теме, которая к настоящему времени мало изучена в теплофизических исследованиях динамических процессов и разрядной плазмы. Однако следует учитывать, что магнитное поле, в свою очередь, существенно влияет на характерные параметры электрофизических систем и энергетических установок.

Ключевые слова: излучающий разряд, плазма, нагрев, теплофизика, энергетика

Введение. К источникам излучения с омическим нагревом, или, иначе, сильноточным излучающим разрядам (СИР), относятся разряды, в которых действие собственных электромагнитных сил направлено на магнитную локализацию формирующегося в межэлектродном зазоре плазменного образования [1–13]. При этом роль кинетической энергии плазмы в энергобалансе разряда должна быть минимальной при максимально эффективном преобразовании джоулевой энергии непосредственно во внутреннюю энергию плазмы.

Отметим, что сам омический механизм нагрева плазмы будет эффективен при условии превышения скорости передачи энергии от электронов к ионам над скоростью передачи энергии электрического поля к электронам. Это условие выполняется при ограничении плотности тока разряда j величиной $j_{кр} \approx en_e (3kT/M)^{1/2}$, где e — заряд электрона, n_e — концентрация электронов, k — постоянная Больцмана, T — температура, M — масса. В характерных случаях ($n_e \approx 10^{18} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $T \approx 10 \dots 100 \text{ эВ}$) значение этой величины составляет $j_{кр} \leq 1 \text{ МА/см}^2$. Кроме того, эффективный ввод джоулевой энер-

* Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № FSN-2024-0022.

гии в плазму таких разрядов должен осуществляться в условиях ограничения теплового расширения нагреваемой плазмы, т. е. при ограничении характерного поперечного размера b , поскольку при этом реализуются наибольшие значения активного сопротивления плазмы $R_{\text{пл}} \approx L / [\pi b^2 \sigma(T)]$, где L — длина межэлектродного зазора, σ — проводимость плазмы с температурой T . В СИР поперечное ограничение плазменного канала может осуществляться не только магнитным полем, но и газом и твердыми стенками.

Наиболее перспективными с точки зрения повышения яркостных температур плазмы СИР являются так называемые открытые разряды, развивающиеся в неограниченной (или частично ограниченной) твердыми стенками среде: открытые СИР в вакууме и газах. В соответствии с действующими факторами, обеспечивающими ограничение быстрого расширения плазменного канала, все открытые СИР подразделяют следующим образом:

- вакуумные открытые неограниченные разряды с действием только сжимающих электромагнитных сил;
- вакуумные открытые поверхностные разряды с действием сжимающих электромагнитных сил и твердой диэлектрической поверхностью;
- газовые открытые неограниченные разряды (ОНР) с действием сжимающих электромагнитных сил и противодействия окружающего разряд газа;
- газовые открытые поверхностные разряды (ОПР), в которых ограничения теплового расширения плазмы осуществляется одновременно электромагнитными силами, внешней газовой средой и твердой поверхностью.

Разряды и режимы. Одной из важнейших особенностей любого процесса радиационной плазмодинамики (РПД-процесса) является существование сильных нелинейных взаимодействий между различными составляющими его процессами: радиационными, газодинамическими, электромагнитными и теплофизическими. Из-за сложности локальной диагностики и экспериментального исследования таких РПД-процессов и явлений во многих случаях экспериментальные данные о параметрах и характеристиках изучаемого процесса или явления носят интегральный характер, его часто недостаточно для нахождения причинно-следственных связей, определяющих основные физические закономерности, и выявления эффективных путей оптимизации и управления этими процессами. В такой ситуации успех в создании высокоэнергетичных РПД-систем и установок различного назначения в значительной мере зависит от уровня теоретических разработок. При этом наиболее эффективным методом исследования следует признать вычислительный эксперимент, способный на некоторых этапах заменить дорогостоящие натурные эксперименты, а в ситуации, когда экспериментальные данные практиче-

ски отсутствуют, численное моделирование остается единственной возможностью получить как качественные, так и количественные данные о процессе.

В общем случае описание радиационных магнито-плазодинамических процессов в рассматриваемых типах электроразрядных источниках должно осуществляться в трехмерном пространственном приближении. Решение приведенной системы уравнений в таком случае даже в настоящее время представляется весьма сложным. Поэтому целесообразно рассмотреть и построить иерархию пространственно-приближенных моделей на базе полной системы уравнений, включающую простейшие одномерные модели, которые позволят выявить основные качественные особенности динамики и спектрально-яркостных характеристик разрядов.

Магнито-газодинамический (МГД-режим) имеет место в некотором интервале значений средней удельной электрической мощности $P_{эл} \in [P_{кр1}, P_{кр2}]$. Критерием, определяющим окончание МГД-режима, служит полная деградация газодинамического разрыва (ГД-разрыва), как внешней границы разрядов. Физические причины, обуславливающие выход разрядов из МГД-режима, связаны с усилением (ростом $P_{эл}$) действующих в разрядной зоне радиационных потоков и электромагнитных сил. При значениях $P_{эл} > P_{кр2}$ поглощенные областью ГД-разрыва потоки излучения должны оказаться достаточными для прогрева за время, не превышающее половину времени действия $P_{кр1}$, всей пограничной области ГД-разрыва до температуры, при которой в ней протекает ток, и возникающие тормозящие электромагнитные силы будут превышать динамическое давление газа в ГД-разрыве, обуславливая тем самым радиационно-магнитогазодинамический эффект исчезновения области ГД-разрыва и перехода разрядов в квазипинчевый режим.

Критические значения удельной электрической мощности $P_{кр2}$, которые служат верхней границей существования МГД-режима, зависят от типа разряда и свойств окружающей среды. Как показали расчеты, для ОНР в аргоне $P_{кр2} \approx 140$ МВт/см, а для ОПР в аргоне $P_{кр2} \approx 300$ МВт/см, т. е. $P_{кр2}$ для ОПР в аргоне приблизительно в 2 раза превышает $P_{кр2}$ для ОНР в аргоне. Основная причина такого различия $P_{кр2}$ заключается в различии скоростей движения ГД-разрыва для ОНР и ОПР. Для ОПР более высокие скорости и уровни значений скоростного напора газа в ГД-разрыве требует для его торможения больших значений электромагнитных сил, действующих в области ГД-разрыва, а следовательно, и более высоких значений $P_{эл}$.

Существенное влияние на значение $P_{кр2}$ оказывают оптические свойства окружающего газа. Необходимым условием, определяющим возможность полной деградации ГД-разрыва, является условие проникновения излучения,

генерируемого высокотемпературной плазменной областью разряда, в газовый слой ГД-разрыва с интенсивностью и спектральными свойствами, обеспечивающими нагрев этого слоя до температуры $T_1 \approx 20$ кК, при которой эффективно начинает действовать тормозящая электромагнитная сила. Характерным оптическим свойством воздушной среды является относительно низкое значение спектральной границы «окна прозрачности» холодного ($T < 15$ кК) воздуха – $h\nu_{\text{гр}} \approx 6$ эВ, где h — постоянная Планка, $\nu_{\text{гр}}$ — граничная частота излучения. Увеличение $P_{\text{эл}}$ приводит к росту температуры плазменной зоны разряда T_2 и смещению максимума спектра излучения в область коротковолнового диапазона ($h\nu_m \approx 3kT_2$ эВ), где ν_m — максимальная частота излучения; k — постоянная Больцмана. При характерных для МГД-режима ($P_{\text{эл}} > 40$ МВт/см) значениях температуры $T_2 > 40$ кК основная часть теплового излучения, генерируемого высокотемпературной плазмой, находится в области коротковолнового излучения с энергией квантов $h\nu_m > 12$ эВ и находится вне «окна прозрачности» холодного ($T < 15$ кК) воздуха. Излучение не может проникнуть в ГД-разрыв, нагреть его до температуры $T_1 \sim 20$ кК и за время первого полупериода t_1 обеспечить условия необходимые для полной деградации ГД-разрыва.

Описание особенностей. Для выявления основных качественных особенностей динамики и спектрально-яркостных характеристик разрядов на основной фазе выделения джоулевой энергии, т. е. в первом полупериоде разрядного тока, можно ограничиться одномерным приближением. При этом для ОПР в качестве приоритетного выделяется направление, перпендикулярное к поверхности межэлектродной вставки, а для ОНР — направление, перпендикулярное оси симметрии разряда. Чтобы обеспечить идентичность условий сравнения радиационно-магнитоплазменодинамических процессов в ОПР и ОНР для обоих разрядов, была выбрана простейшая геометрия — плоский разряд с конфигурацией простого Z-пинча.

Численные исследования плазменодинамических процессов разрядов, развивающихся в аргоне (Ar) или воздушной среде (Air) атмосферного давления, проводили при вариациях длины межэлектродного зазора $L = 25 \dots 100$ см, запасаемой в накопителе емкости $C = 3 \dots 10$ мкФ, энергии $W_0 = CU_0^2/2 \approx \approx 1 \dots 100$ кДж ($U_0 \approx 25 \dots 300$ кВ) и длительности первого полупериода тока разряда $t_1 = 5 \dots 10$ мкс. Диапазон изменения средней удельной (на единицу длины межэлектродного зазора L) электрической мощности, выделяемой в плазме составил $P_{\text{эл}} = 1 \dots 400$ МВт/см. Ширина электродов разряда $b = 1$ см. В качестве материала межэлектродной вставки для ОПР выбрана корундовая (Al_2O_3) керамика, теплофизические характеристики которой взяты из [14].

На начальной существенно нестационарной стадии разряда $t = [0...t_n]$ происходит переход от исходного ($t = 0, J = 0$) состояния (моделирующего ситуацию после пробоя межэлектродного промежутка разряда) к квазистационарному состоянию. Результаты расчетов показали, что значения t_n для исследуемых условий не превышают 1 мкс. В течение остальной части времени первого полупериода тока ($t_n...t_1$) — фазы основного выделения джоулевой мощности — пространственные распределения радиационно-плазмодинамических параметров плазменного образования имеют квазистационарный характер, по виду этих параметров можно судить об особенностях возникающих структур и динамики распространения разрядной плазмы, а следовательно, говорить о режимах осуществления разряда.

Оба типа рассматриваемых СИР (ОПР и ОНР) характеризуются сильным затуханием разрядного тока с максимальным джоулевым энерговыделением

в плазме $W_1 = \int_0^{t_1} R_{пл} J^2 dt \approx (0,40...0,99) CU_0^2/2$ в первом полупериоде $t_1 \leq 10$ мкс разрядного тока J .

На основании анализа степени влияния отдельных параметров разрядов было установлено, что основным физическим параметром, определяющим излучательные и плазмодинамические характеристики разряда, является средняя (за первый полупериод) удельная (на единицу длины L) скорость ввода энергии в плазму разряда $P_{эл} = W_1/Lt_1$, значение которой в данных расчетах изменялась в диапазоне 1...400 МВт/см. Также было выяснено, что в условиях ограничения расширения плазменного образования газовой средой и собственным магнитным полем СИР в зависимости от $P_{эл}$ может существовать в трех различных квазистационарных режимах (взрывном, магнитногозодинамическом и квазипинчевом), различающихся структурой и параметрами плазмы.

Рассмотрим особенности поведения радиационно-плазмодинамических параметров СИР в каждом из них. Граничные значения средней удельной электрической мощности $P_{эл}$, определяющие области существования режимов, зависят от свойств окружающего газа и различны для ОНР и ОПР, отражая специфические особенности ОПР, связанные с наличием твердой диэлектрической поверхности, которая является жестким пространственным ограничителем и источником светоэрозионной плазмы.

Выполненные расчеты и их анализ показали, что режимы СИР связаны с параметрами плазмы (скорость, плотность и др.) в граничных зонах расширяющегося плазменного образования. При $P_{эл} < P_{кpl}$ осуществляется «взрывной» режим, при котором внешней границей разряда служит газодинамическая ударная волна, распространяющаяся в окружающий газ со скоростью

$D \sim P_{\text{эл}}^{1/3}$. При магнитогазодинамическом режиме ($P_{\text{кр1}} \leq P_{\text{эл}} \leq P_{\text{кр2}}$) имеет место ограничение роста скорости D внешней границы разряда при увеличении удельной электрической мощности. В магнитогазодинамическом режиме появляется эффект деградации ударной волны, при котором степень сжатия газа за внешним разрывом становится меньше степени сжатия по Гюгонио и продолжает уменьшаться по мере увеличения вкладываемой в плазму мощности.

Эффект деградации ударной волны наблюдался в экспериментах [15] в условиях действия сильных внешних полей на плазму искрового разряда. В квазипинчевом режиме при $P_{\text{эл}} > P_{\text{кр2}}$ внешний разрыв превращается из разрыва сжатия в радиационно-магнитогазодинамическую волну разрежения. Значения $P_{\text{кр2}}$ для ОНР и ОНР различаются, отражая специфические особенности ОНР, связанные с наличием твердой диэлектрической поверхности, которая является жестким пространственным ограничителем и источником светоэрозионной плазмы. Подобные мощные разряды и источники излучения могут применяться для широкого круга задач [16–27].

Заключение. В работе приведен элемент иерархии радиационно-плазмодинамических математических моделей, которые предназначены для исследования импульсных электроразрядных источников различного класса. С помощью расчетных исследований получены данные о радиационно-плазмодинамических процессах и явлениях в импульсных эрозионных электроразрядных источниках ультрафиолетового излучения и ударных волн различного типа. Для электрических плазменных разрядов установлены критерии, которые определяют режимы осуществления разряда, различающиеся степенью влияния электромагнитных процессов и, как следствие, динамикой формирования и пространственными распределениями параметров плазмы. Кратко описан эффект радиационно-магнитной деградации ударной волны, проявляющийся в уменьшении степени сжатия газа на фронте и имеющий место в условиях радиационной ионизации газа в районе фронта и действия тормозящих электромагнитных сил.

Литература

- [1] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Computational and experimental modeling in magnetoplasma aerodynamics and high-speed gas and plasma flows (A Review). *Aerospace*, 2023, vol. 10, art. no. 662.
<https://doi.org/10.3390/aerospace10080662>
- [2] Чирков А.Ю., Рыжков С.В. Воздействие мощных тепловых и нейтронных потоков на элементы конструкции термоядерных и ядерных энергоустано-

- вок. *Ядерная физика и инжиниринг*, 2017, т. 8, № 6, с. 513–522.
<https://doi.org/10.1134/S2079562917050050>
- [3] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Numerical modeling of individual plasma dynamic characteristics of a light-erosion MPC discharge in gases. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, art. no. 3610. <https://doi.org/10.3390/app12073610>
- [4] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. The Qualitative and Quantitative Study of Radiation Sources with a Model Configuration of the Electrode System. *Symmetry*, 2021, vol. 13 (6), art. no. 927. <https://doi.org/10.3390/sym13060927>
- [5] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical simulation of pulsed jets of a high-current pulsed surface discharge. *Computational thermal sciences*, 2021, vol. 13, pp. 45–56. <http://doi.org/10.1615/ComputThermalScien.2020034742>
- [6] Mozgovoy A.G., Romadanov I.V., Ryzhkov S.V. Formation of a compact toroid for enhanced efficiency. *Physics of Plasmas*, 2014, vol. 21, art. no. 022501. <http://doi.org/10.1063/1.4863452>
- [7] Ryzhkov S.V. Compact toroid and advanced fuel — together to the Moon?! *Fusion Science and Technology*, 2005, vol. 47, no. 1T, pp. 342–344.
<http://doi.org/10.13182/FST05-A684>
- [8] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Evaluation of the possibility of ignition of a hydrogen-oxygen mixture by erosive flame of the impulse laser. *Laser Physics*, 2019, vol. 29, art. no. 096001. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/ab342d>
- [9] Ryzhkov S.V. Magneto-Inertial Fusion and Powerful Plasma Installations (A Review). *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, art. no. 6658.
<https://doi.org/10.3390/app13116658>
- [10] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Simulation of parameters of plasma dynamics of a magnetoplasma compressor. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13 (9), art. no. 5538. <https://doi.org/10.3390/app13095538>
- [11] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Calculation of heat transfer and drag coefficients for aircraft geometric models. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12 (21), art. no. 11011. <https://doi.org/10.3390/app122111011>
- [12] Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V., Bagryansky P.A., Anikeev A.V. Plasma kinetics models for fusion systems based on the axially-symmetric mirror devices. *Fusion Science and Technology*, 2011, vol. 59, no. 1T, pp. 39–42.
<https://doi.org/10.13182/FST11-A11570>
- [13] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Thermophysical Parameter Estimation of a Neutron Source Based on the Action of Broadband Radiation on a Cylindrical Target. *Fusion Science and Technology*, 2023, vol. 79, pp. 399–406.
<https://doi.org/10.1080/15361055.2022.2112037>
- [14] Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. *Физические величины: справочник*. Москва, Энергоатомиздат, 1991, 1231 с.
- [15] Омаров О.А., Эльдаров Ш.Ш., Якубов И.В. Особенности распространения ударной и тепловой волн при разряде во внешнем магнитном поле. *ТВТ*, 1993, т. 31, № 4, с. 526–530.

- [16] Ryzhkov S.V. Modeling of plasma physics in the fusion reactor based on a field-reversed configuration. *Fusion Science and Technology*, 2009, vol. 55, no. 2T, pp. 157–161. <https://doi.org/10.13182/FST09-A7004>
- [17] Кузенов В.В., Рыжков С.В. Численное моделирование взаимодействия мишени магнитно-инерциального термоядерного синтеза с плазменным и лазерным драйверами. *TBT*, 2021, т. 59, № 4, с. 492–501. <https://doi.org/10.31857/S0040364421040141>
- [18] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Estimation of the neutron generation in the combined magneto-inertial fusion scheme. *Physica Scripta*, 2021, vol. 96, art. no. 125613. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac2543>
- [19] Рыжков С.В., Чирков А.Ю. *Системы альтернативной термоядерной энергетики*. Москва, Физматлит, 2017, 200 с.
- [20] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. The adaptive composite block-structured grid calculation of the gas-dynamic characteristics of an aircraft moving in a gas environment. *Mathematics*, 2022, vol. 10, art. 2130. <http://doi.org/10.3390/math10122130>
- [21] Рудинский А.В., Ягодников А.В., Рыжков С.В., Онуфриев В.В. Особенности формирования собственного электрического поля низкотемпературной кислород-метановой плазмы. *Письма в ЖТФ*, 2021, т. 47, вып. 10, с. 42–45. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.10.50973.18638>
- [22] Рыжков С.В. Моделирование теплофизических процессов в магнитном термоядерном двигателе. *Тепловые процессы в технике*, 2009, № 9, с. 397–400.
- [23] Клименко Г.К., Кузенов В.В., Ляпин А.А., Рыжков С.В. *Расчет, моделирование и проектирование генераторов низкотемпературной плазмы*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, 264 с.
- [24] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure. *Physics of Plasmas*, 2019, vol. 26, art. no. 092704. <http://doi.org/10.1063/1.5109830>
- [25] Ryzhkov S.V. Comparison of a deuterium-helium-3 FRC and mirror trap for plasma confinement. *Fusion Science and Technology*, 2007, vol. 51 (no. 2T), pp. 190–192. <http://doi.org/10.13182/FST07-A1347>
- [26] Кузенов В.В., Рыжков С.В. Плазмодинамическое моделирование взаимодействия импульсных плазменных струй. *Ядерная физика и инжиниринг*, 2018, т. 9, № 1, с. 63–68. <http://doi.org/10.1134/S207956291706015X>
- [27] Shumeiko A.I., Telekh V.D., Ryzhkov S.V. Probe Diagnostics and Optical Emission Spectroscopy of Wave Plasma Source Exhaust. *Symmetry*, 2022, vol. 14 (10), art. no. 1983. <https://doi.org/10.3390/sym14101983>

Поступила в редакцию 25.11.2024

Савватимова Полина Романовна — студентка кафедры «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Рыжков Сергей Витальевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация. E-mail: svryzhkov@bmstu.ru. SPIN-code 8978-9250.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Савватимова П.Р. Теплофизические процессы источников излучения на основе электроразрядной плазмы. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 3 (98). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/phys/plas/1049.html>

THERMOPHYSICAL PROCESSES IN THE RADIATION SOURCES BASED ON THE ELECTRIC DISCHARGED PLASMA

P.R. Savvatimova

poli.savvatimova@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The paper considers an element in the radiation-plasmadynamic mathematical models hierarchy, the models are intended for studying the pulsed electric discharge sources of various classes. It uses computational research to obtain data on the radiation-plasmadynamic processes and phenomena in the pulsed erosive electric discharge sources of the ultraviolet radiation and shock waves of various types. The paper considers mainly the open unlimited and surface discharges. It analyzes, among the other issues, accounting for the magnetic field; this topic is being insignificantly studied to date in thermophysics of the dynamic processes and discharge plasma. However, it should be noted that magnetic field, in turn, is affecting significantly characteristic parameters of the electrophysical systems and power plants.

Keywords: radiating discharge, plasma, heating, thermal physics, power engineering

Received 25.11.2024

Savvatimova P.R. — Student, Department of Refrigeration and Cryogenic Equipment, Air Conditioning and Life Support Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Ryzhkov S.V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Professor of the Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. E-mail: svryzhkov@bmstu.ru, SPIN-code: 8978-9250.

Please cite this article in English as:

Savvatimova P.R. Thermophysical processes in the radiation sources based on the electric discharged plasma. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 3 (98). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/phys/plas/1049.html>