УДК 536.24 : 537.8
DOI 10.58649/1694-9099-2026-2-440-445

Кайрыев Н.Ж., Малкин А.В., Байтереков А.Т.
Жусуп Баласагын атындагы КУУ,
Б.Н. Ельцин атындагы Кыргыз-Россия Славян университети
Кайрыев Н.Ж.,[1] Малкин А.В.,[2] Байтереков А.Т.[1]
КНУ имени Жусупа Баласагына,[1]
Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б.Н. Ельцина[2]
Kairyev N.Z., Malkin A.V., Baiterekov A.T.
KNU Jusup Balasagyn,
B.N. Yeltsin Kyrgyz-Russian Slavic University

ГАЗ АГЫМЫНДАГЫ ҮЗГҮЛТҮКСҮЗ ОПТИКАЛЫК РАЗРЯДДЫН ЭКИ ӨЛЧӨМДҮҮ МОДЕЛИ
ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ НЕПРЕРЫВНОГО ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ ГАЗА
TWO-DIMENSIONAL MODEL OF A CONTINUOUS OPTICAL DISCHARGE IN A GAS FLOW

Кыскача мүнөздөмө: Бул иште атмосфералык басымдагы аргон агымында фокусталган CO_2-лазердин нурлануусу менен кармалып туруучу үзгүлтүксүз оптикалык разряддын өз ара шайкеш эки өлчөмдүү математикалык модели берилген. Модель радиациялык газ динамикасы менен лазердик нурлануунун квазиоптикалык жакындашууда таралышынын өз ара таасирин эске алат. Моделди сандык ишке ашыруу COMSOL Multiphysics программалык комплексинин жардамы менен жүргүзүлүшү мүмкүн.

Аннотация: В работе представлена самосогласованная двумерная математическая модель непрерывного оптического разряда, поддерживаемого сфокусированным излучением CO_2-лазера в потоке аргона атмосферного давления. Модель учитывает взаимовлияние радиационной газодинамики и распространения лазерного излучения в квазиоптическом приближении. Численная реализация модели может быть выполнена с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics.

Abstract: The paper presents a self-consistent two-dimensional mathematical model of a continuous optical discharge maintained by focused CO_2 laser radiation in an atmospheric-pressure argon flow. The model accounts for the mutual influence of radiative gas dynamics and laser radiation propagation within the quasi-optical approximation. Numerical implementation of the model can be performed using the COMSOL Multiphysics software package.

Негизги сөздөр: үзгүлтүксүз оптикалык разряд; аргон плазмасы; математикалык моделдөө; квазиоптикалык жакындаштыруу; COMSOL Multiphysics.

Ключевые слова: непрерывный оптический разряд; аргоновая плазма; математическое моделирование; квазиоптическое приближение; COMSOL Multiphysics.

Keywords: continuous optical discharge; argon plasma; mathematical modeling; quasi-optical approximation; COMSOL Multiphysics.

Введение. Непрерывный оптический разряд (НОР) представляет собой уникальное физическое явление - стационарную плазму, поддерживаемую в свободном газе за счет энергии сфокусированного лазерного излучения. Фундаментальные основы физики этого процесса были заложены в классических трудах Ю. П. Райзера [1], где НОР рассматривается как процесс «светового горения», при котором распространение фронта ионизации поддерживается механизмами теплопроводности и поглощения лазерной энергии. С практической точки зрения НОР представляет значительный интерес как стабильный источник высокочистой плотной плазмы для оптических плазмотронов, лазерной сварки и ракетных двигателей.

Экспериментальные исследования, начатые еще в 1970-х годах, показали, что для существования НОР необходим баланс между мощностью лазера и потерями энергии из плазменного образования. В работе Кифера и соавторов [2] было детально изучено поведение разряда в сходящихся лазерных пучках, что позволило определить пороги поддержания плазмы в зависимости от геометрии фокусировки. Особое значение имеет стабилизация разряда потоком газа. Генералов и соавторы [3] экспериментально продемонстрировали, что набегающий поток газа не только охлаждает периферию разряда, предотвращая его прижатие к стенкам канала, но и позволяет управлять пространственным положением плазменного сфероида.

Математическое моделирование НОР является сложной вычислительной задачей из-за сильной нелинейности свойств плазмы и тесной взаимосвязи радиационных, газодинамических и электродинамических процессов. Значительный вклад в развитие численных методов исследования НОР внесли Суржиков и Ченцов [4], разработавшие модели радиационной газодинамики для анализа структуры разряда в продольных потоках. В работах Кулумбаева и Лелевкина [5] исследовались особенности моделирования НОР в условиях поперечного обдува, что расширило понимание механизмов теплообмена плазмы с окружающей средой.

Несмотря на достигнутые успехи, описание распространения лазерного излучения в плазме часто упрощалось до геометрической оптики или закона Бугера. Однако для точного расчета нагрева необходимо учитывать дифракционное расхождение и рефракцию луча на градиентах электронной концентрации. Использование квазиоптического приближения, предложенного в работе Рафатова и соавторов [6], позволяет корректно моделировать волновые эффекты при распространении излучения в плазменной среде, что критически важно для определения устойчивости разряда. При этом для адекватного сравнения расчетных данных с экспериментом требуется точное определение параметров лазерного источника, включая распределение интенсивности в фокальном пятне [7].

Настоящая работа посвящена разработке самосогласованной двумерной математической модели НОР в аргоновом потоке, объединяющей уравнения Навье - Стокса для сжимаемого газа, уравнение энергии и параболическое уравнение для амплитуды лазерного поля. Особенностью модели является детальный учет нелинейных зависимостей коэффициента поглощения и показателя преломления аргона от температуры, что позволяет исследовать стабилизацию разряда в широком диапазоне скоростей потока.

Постановка задачи. Объектом исследования является непрерывный оптический разряд, возникающий в фокальной области сфокусированного излучения CO_2-лазера. Разряд поддерживается в цилиндрическом канале радиусом RRR и длиной LLL, через который прокачивается рабочий газ - аргон - при атмосферном давлении.

Рассматривается двумерная осесимметричная область в цилиндрических координатах (r,z)(r, z)(r,z). Ось zzz совпадает с оптической осью лазерного луча и осью симметрии канала. Лазерное излучение с длиной волны λ=10,6\lambda = 10{,}6λ=10,6 мкм падает на входное сечение канала (z=0)(z = 0)(z=0) и фокусируется в точке с координатой z=zfz = z_fz=zf. Газовый поток подается коаксиально лазерному лучу в положительном направлении оси zzz.

Предполагается, что:

– плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия (ЛТР), что позволяет описывать состояние среды единой температурой TTT;

– течение газа является ламинарным и установившимся;

– газ считается сжимаемым, при этом число Маха существенно меньше единицы (M≪1)(M \ll 1)(M≪1), что позволяет пренебречь диссипацией вязкости и работой сил давления в уравнении энергии;

– распространение лазерного излучения описывается в рамках квазиоптического приближения, учитывающего дифракцию, поглощение и рефракцию на неоднородностях плазмы.

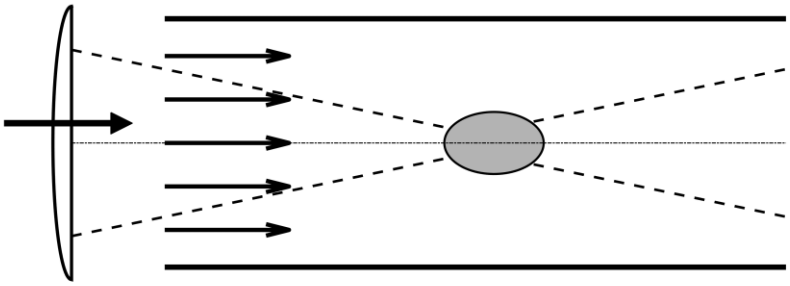


Рисунок 1. Схема непрерывного оптического разряда

Математическая модель. Уравнения. Самосогласованная модель строится на основе системы уравнений радиационной газодинамики и волнового уравнения для электромагнитного поля.

Движение плазмообразующего газа описывается уравнениями Навье-Стокса для сжимаемой среды и уравнением неразрывности:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho v)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho u)=0,(1)$$

$$\rho\left(v\frac{\partial u}{\partial r}+u\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)\right]+2\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial z}\right)-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial z}(\mu\nabla\cdot\mathbf{V}),(2)$$

$$\rho\left(v\frac{\partial v}{\partial r}+u\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{2}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\mu\frac{\partial v}{\partial r}\right)-2\mu\frac{v}{r^2}+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)\right]-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial r}(\mu\nabla\cdot\mathbf{V}),(3)$$

где $\mathbf{V}=(v,u)$ - вектор скорости с радиальной (v) и аксиальной (u) компонентами; ρ - плотность; μ - динамическая вязкость; p - давление.

Баланс энергии в плазменном образовании определяется конвективным переносом, молекулярной теплопроводностью и радиационными процессами:

$$\rho C_p\left(v\frac{\partial T}{\partial r}+u\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q_{las}-Q_{rad}.(4)$$

Здесь: $C_p(T)$ - удельная теплоемкость при постоянном давлении; $\lambda(T)$ - коэффициент теплопроводности; $Q_{rad}(T)$ - объемные потери на высвечивание плазмы (радиационные потери); Q_{las} - мощность, поглощаемая из лазерного луча.

Распространение сфокусированного излучения описывается параболическим уравнением для комплексной амплитуды электрического поля $A(r,z)$, связанной с полным полем соотношением $E=A\exp(-ikz)$:

$$2ik\frac{\partial A}{\partial z}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial A}{\partial r}\right)+k^2\left(\tilde{n}^2-1\right)A=0.(5)$$

Комплексный показатель преломления $\tilde{n}=n-i\kappa$ определяется концентрацией свободных электронов n_e и частотой их столкновений. Действительная часть n отвечает за рефракцию (эффект тепловой линзы), а мнимая часть κ связана с коэффициентом поглощения α соотношением $\kappa=\alpha/2k$.

Поглощаемая мощность рассчитывается как:

$$Q_{las} = \frac{1}{2}\sigma |A|^2 = \alpha(T) I(r,z).$$

Граничные условия. Для замыкания системы уравнений формулируются следующие краевые условия:

- **На входе ($z = 0$):** задается профиль скорости $u = u_0 f(r)$, температура $T = T_0$ и распределение амплитуды лазерного поля $A = A_0(r)$, соответствующее Гауссову пучку.
- **На выходе ($z = L$):** условия свободного протекания для газа ($\partial \mathbf{V} / \partial z = 0$, $p = p_{atm}$) и отсутствие обратных температурных градиентов ($\partial T / \partial z = 0$).
- **На оси ($r = 0$):** условия симметрии для всех скалярных величин и зануление радиальной компоненты скорости.
- **На стенке ($r = R_c$):** условия прилипания для скорости ($\mathbf{V} = 0$) и фиксированная температура стенки ($T = T_w$).

Свойства среды. Зависимости $\rho(T)$, $C_p(T)$, $\lambda(T)$, $\mu(T)$, а также оптические коэффициенты $\alpha(T)$ и $n(T)$ задаются в виде интерполяционных таблиц, рассчитанных для аргона атмосферного давления в широком температурном диапазоне ($300 - 20000$ К).

Методы расчета и компьютерная реализация. Численное решение сформулированной системы уравнений (1)–(5) представляет собой сложную вычислительную задачу ввиду сильной нелинейности коэффициентов и взаимной зависимости физических полей. Для реализации модели выбран метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

Для обеспечения самосогласованности задачи в расчетной схеме задействованы следующие модули:

- **Laminar Flow (spf):** решение уравнений Навье-Стокса для сжимаемого потока аргона.
- **Heat Transfer in Fluids (ht):** расчет температурного поля с учетом конвекции и теплопроводности. В качестве источников тепловыделения и потерь подключены узлы Electromagnetic Heating и User-defined Heat Source для радиационного охлаждения.
- **Electromagnetic Waves, Beam Envelopes (ewbe):** расчет распространения лазерного излучения в квазиоптическом (параксиальном) приближении. Использование формулировки Unidirectional позволяет существенно снизить требования к оперативной памяти, так как расчет ведется для плавно меняющейся огибающей амплитуды поля.

Ввиду того, что градиенты температуры и интенсивности излучения в фокальной зоне крайне велики, использована неоднородная сетка.

- **В радиальном направлении:** применено сгущение ячеек к оси симметрии ($r = 0$) с использованием арифметической прогрессии, что позволяет детально разрешить структуру гауссова пучка и плазменного ядра.
- **В аксиальном направлении:** сетка сгущена в окрестности фокуса z_f . Благодаря использованию интерфейса Beam Envelopes, шаг сетки вдоль оси z может превышать длину волны лазера в десятки раз без потери точности, что является ключевым преимуществом перед полноволновыми методами.

Прямое решение стационарной задачи для холодного газа часто приводит к расходимости из-за отсутствия поглощения при $T = 300$ К. Для обеспечения сходимости реализован следующий алгоритм:

1. **Шаг 1 (Холодная продувка):** Расчет стационарного поля скоростей и давления в канале без учета нагрева. Это решение используется в качестве начального приближения для гидродинамики.

2. **Шаг 2 (Инициация разряда):** Введение в область фокуса «затравочного» теплового источника гауссовой формы с температурой $T \approx 10000$ К. Это позволяет «включить» механизм обратного тормозного поглощения лазерного луча.

3. **Шаг 3 (Самосогласованный расчет):** Использование параметрического решателя по мощности лазера или скорости потока. Мощность искусственного источника плавно снижается до нуля, переводя разряд в режим самоподдержания за счет энергии лазера.

Для решения систем линейных уравнений на каждой итерации метода Ньютона использовался прямой решатель MUMPS или итерационный решатель GMRES, в зависимости от плотности сетки и доступных вычислительных ресурсов.

Учитывая экспоненциальную зависимость коэффициента поглощения $\alpha(T)$, для предотвращения осцилляций температуры введена дополнительная искусственная диффузия (Isotropic Diffusion) на этапе подбора параметров, которая отключается при достижении финальной сходимости.

Выводы. В данной работе разработана самосогласованная двумерная математическая модель непрерывного оптического разряда в потоке аргона при атмосферном давлении. На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Сформулированная система уравнений, объединяющая радиационную газодинамику, уравнения Навье - Стокса и волновое уравнение электродинамики, позволяет рассматривать НОР как единую физическую систему. Учет взаимовлияния температуры плазмы, поля скоростей газа и интенсивности лазерного излучения является необходимым условием адекватного моделирования процессов в оптических плазмотронах.

2. Использование квазиоптического приближения, основанного на параболическом волновом уравнении, позволяет корректно учитывать не только поглощение, но и эффекты дифракции и рефракции. Показано, что отрицательная рефракция на свободных электронах, связанная с эффектом тепловой линзы, играет определяющую роль в формировании пространственной структуры разряда, приводя к дефокусировке излучения и стабилизации максимальной температуры плазмы.

3. Модель позволяет детально исследовать механизмы стабилизации плазменного образования набегающим потоком газа. Наличие вынужденной конвекции обеспечивает вынос энергии из зоны разряда, что дает возможность управлять его геометрическими размерами и положением относительно фокуса линзы, предотвращая эрозию стенок канала.

4. Предложенный алгоритм реализации модели в программном комплексе COMSOL Multiphysics с использованием метода «горячего пятна» и параметрического сканирования по мощности представляет собой эффективный инструмент для проведения численных экспериментов. Это позволяет оптимизировать параметры лазерных плазмотронов, включая мощность лазера, фокусное расстояние и скорость прокачки газа, без проведения дорогостоящих натурных испытаний.

Разработанная модель может служить теоретической основой для дальнейших исследований неустойчивостей оптического разряда и быть расширена для описания многокомпонентных газовых смесей, а также нестационарных режимов горения плазмы.

Список использованной литературы

1. Raizer, Yu. P. Gas Discharge Physics / Yu. P. Raizer. - Berlin: Springer, 1991.

2. Keefer, D. R. Experimental study of a continuous optical discharge in a converging beam / D. R. Keefer, B. B. Henriksen, F. Braerman // Journal of Applied Physics. - 1975. - Vol. 46. - P. 1080.

3. Generalov, N. A. Continuous optical discharge in a gas flow / N. A. Generalov, A. M. Zakharov, V. D. Kosynkin, M. Yu. Yakimov // Fizika Goreniya i Vzryva. - 1986. - Vol. 22, № 2. - P. 91.

4. Surzhikov, S. T. Numerical simulation of a continuous optical discharge in a gas flow / S. T. Surzhikov, A. A. Chentsov // Plasma Physics Reports. - 1996. - Vol. 22. - P. 957.

5. Kulumbaev, E. B. Numerical modeling of a continuous optical discharge in a transverse gas flow / E. B. Kulumbaev, V. M. Lelevkin // Plasma Physics Reports. - 1999. - Vol. 25. - P. 517.

6. Rafatov, I. R. Modelling of a continuous optical discharge stabilized by a gas flow in quasi-optical approximation / I. R. Rafatov, B. Yedierler, E. B. Kulumbaev // Journal of Physics D: Applied Physics. - 2009. - Vol. 42. - Art. 055212.

7. Токтогонов, С. А. Определение параметров мощного непрерывного лазерного излучения / С. А. Токтогонов, А. С. Ганыева, И. Ч. Мурзакулова // Вестник КНУ им. Ж. Баласагына. - 2013. - № 3. - С. 77–79.

Рецензент: доктор физико-математических наук, профессор Касмамытов Н.К.

УДК 536.75:621.373.826:007.52
DOI 10.58649/1694-9099-2026-2-445-450

Токтогонов С.А.
Жусуп Баласагын атындагы КУУ
Токтогонов С.А.
КНУ имени Жусупа Баласагына
Toktogonov S.
KNU Jusup Balasagyn

ORCID 0009-0007-2851-5988

ЭНТРОПИЯНЫН КӨБӨЙҮҮ МЫЙЗАМЫНЫН УНИВЕРСАЛДУУЛУГУ ЖАНА КВАНТЫК ЭЛЕКТРОНИКА
УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ ЗАКОНА ВОЗРАСТАНИЯ ЭНТРОПИИ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
UNIVERSALITY OF THE LAW OF ENTROPY INCREASE AND QUANTUM ELECTRONICS

Кыскача мүнөздөмө: Макалада физиканын фундаменталдык мыйзамдарына таянып, реалдуу системалардын өнүгүү критерийлерин аныктоо аракети жасалат. Тактап айтканда, физикалык көз караштан алганда «жакшы» жана «жаман», «прогресс» жана «регресс» түшүнүктөрү кандайча чечмеленери каралат. Ошондой эле Ааламдын өнүгүшүндө белгилүү бир багыттуулук барбы же процесстер циклдик жана/же хаостук мүнөздө жүрөбү деген суроолор талданат. Термодинамиканын экинчи мыйзамына - энтропиянын өсүү мыйзамына таянып, реалдуу системалардын өнүгүү алгоритми сунушталат. Бул алгоритмдин иштеши лазердик нурлануунун пайда болушунун мисалында көрсөтүлөт. Системанын өнүгүү критерийи катары анын ички потенциалдык энергиясынын жогорулашы каралат. Алгоритмдин салыштырмалуу жөнөкөй физикалык системаларга гана эмес, татаал коомдук системаларга да колдонулушу мүмкүн экени белгиленет.

Аннотация: В статье на основе фундаментальных законов физики предпринята попытка определить критерии развития реальных систем. В частности, рассматривается, как с физической точки зрения могут быть интерпретированы понятия «хорошее» и «плохое», «прогресс» и «регресс». Также анализируется вопрос о том, существует ли в развитии мироздания определённая направленность или процессы имеют циклический и/или хаотический характер. На основе второго закона термодинамики - закона возрастания энтропии - предложен алгоритм развития реальных систем. Работа данного алгоритма показана на примере образования лазерного излучения. В качестве критерия развития системы рассматривается увеличение её внутренней потенциальной энергии. Отмечается возможность применения данного алгоритма не только к относительно простым физическим системам, но и к сложным общественным системам.