

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-792-803

УДК 533.95:53.06

Численная модель импульсного подкритического стримерного сверхвысокочастотного разряда для задач плазменного поджига топливных смесей в газовой фазе

Павел Викторович Булат¹, Константин Николаевич Волков²,
 Анжелика Игоревна Мельникова³✉, Максим Евгеньевич Ренев⁴

^{1,2,3,4} Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация

² Университет Кингстона, Лондон, SW15 3DW, Великобритания

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

¹ pavelbulat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0099-9953>

² k.volkov@kingston.ac.uk, <https://orcid.org/0000-0001-6055-2323>

³ angelika044@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-7229-0965>

⁴ renevme@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0583-0607>

Аннотация

Предмет исследования. Разработана и верифицирована приближенная модель, предназначенная для оценки плазменного нагрева и конверсии топливных смесей при помощи подкритического стримерного сверхвысокочастотного разряда. Поджиг топливной смеси происходит в среде с давлением 13 кПа и температурой 150 К при наличии внешнего потока воздуха со скоростью до 500 м/с. Для фокусировки электромагнитного излучения использованы антенна-инициатор и плоское зеркало. Стехиометрическая смесь пропана и воздуха или чистый пропан подаются через полость в антенне. Мощность излучения составила 3 кВт. **Метод.** Модель реализована на основе схемы расщепления по физическим процессам, что позволило снизить требования к вычислительным ресурсам. Область, занятая плазмой, и ее проводимость заданы исходя из выбранного набора экспериментальных данных. Расчет плазменного поджига состоял из трех этапов. На первом этапе решены уравнения Больцмана для электронного газа в среде в нульмерной постановке для заданных параметров внешнего электрического поля. В результате получены функции распределения электронной энергии и коэффициентов реакций. На втором этапе рассчитаны уравнения Гельмгольца для распределения напряженности электромагнитного поля вблизи антенны-инициатора с учетом заданной проводящей области. По полученным распределениям электрического поля вычислены мощности джоулевого нагрева и значения коэффициентов реакций. На третьем этапе получены решения уравнений: Навье-Стокса и переноса различных сортов частиц для сжимаемой среды с учетом процессов горения при заданных источниках локального нагрева и плазменных реакций. **Основные результаты.** Получены распределения температуры, состава среды, скорости движения среды при заданных локальной мощности нагрева и дополнительных реакций в области, занятой плазмой. Стехиометрическая смесь пропана с воздухом или чистый пропан, подаваемые через антенну, подожжены плазмой: смесь горит в небольшой области, а пропан окисляется в тонком слое смешения с воздухом. Выполнены сравнения результатов расчетов с данными физического эксперимента: и полей температур, и состава среды с фотографиями пламени из эксперимента. Численное исследование показало, что во всех рассмотренных условиях модель дает близкие к эксперименту результаты, но имеется завышение требуемой для поджига мощности излучения практически в два раза. **Практическая значимость.** Изучение процессов поджига газообразных смесей подкритическим сверхвысокочастотным разрядом представляет интерес для проектирования двигательных установок с повышенной надежностью и возможностью использования трудновоспламеняемых смесей. Предлагаемая модель дает приближенные оценки, позволяя снизить требования к вычислительным ресурсам и времени счета по сравнению с традиционными моделями.

Ключевые слова

плазменный поджиг, численное моделирование, газовая динамика, подкритический разряд, плазма

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ходе реализации проекта «Создание опережающего научно-технического задела в области разработки передовых технологий малых газотурбинных, ракетных и комбинированных двигателей сверхлегких ракет-носителей, малых космических аппаратов и беспилотных воздушных судов, обеспечивающих приоритетные позиции российских компаний на формируемых глобальных рынках будущего», № FZWF-2020-0015.

Ссылка для цитирования: Булат П.В., Волков К.Н., Мельникова А.И., Ренев М.Е. Численная модель импульсного подкритического стримерного сверхвысокочастотного разряда для задач плазменного поджига топливных смесей в газовой фазе // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 4. С. 792–803. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-792-803

Numerical model of a pulsed subcritical streamer microwave discharge for problems of plasma ignition of fuel mixtures in the gas phase

Pavel V. Bulat¹, Konstantin N. Volkov², Anzhelika I. Melnikova³✉, Maksim E. Renev⁴

^{1,2,3,4} Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

² Kingston University, London, SW15 3DW, United Kingdom

⁴ St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

¹ pavelbulat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0099-9953>

² k.volkov@kingston.ac.uk, <https://orcid.org/0000-0001-6055-2323>

³ angelika044@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-7229-0965>

⁴ renevme@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0583-0607>

Abstract

An approximate model for estimating plasma heating and conversion caused by a subcritical streamer microwave discharge has been considered and verified. Ignition occurs in an environment with a pressure of 13 kPa, a temperature of 150 K, there is an external air flow at a speed of up to 500 m/s, an initiator antenna and a flat mirror are used to focus electromagnetic radiation, a stoichiometric mixture of propane-air and pure propane is supplied through the cavity in the antenna. Radiation power is 3 kW. The model is three-stage and semi-empirical. The plasma region and its conductivity are set based on experimental statistics; this is a key feature that reduces the consumption of computing resources. The finite element method is used. At the first stage, the Boltzmann equation for the electron gas in the medium is solved in the zero-dimensional formulation for the given parameters of the external electric field. The distribution functions of the electronic energy are obtained as well as the functions of the reaction coefficients. At the second stage, the Helmholtz equations are solved to obtain the distribution of electromagnetic fields near the antenna-initiator, taking into account the given conducting region “plasma”. Based on the obtained distributions of the electric field, the Joule heating powers and the values of the reaction coefficients are calculated. At the third stage, the Navier-Stokes and transfer equations of various types of particles for a compressible medium are solved; taking into account combustion processes for given local heating and plasma reactions. The results are compared with the data of a physical experiment. The distributions of temperature, composition of the medium, velocity of the medium are considered for given local heating power and additional reactions in the plasma region. A stoichiometric mixture of propane with air and pure propane supplied through the antenna are ignited by plasma under the conditions under consideration: the mixture burns in a small area, propane is oxidized in a thin layer of mixing with air. The temperature fields and composition of the medium are compared with photographs of the flame from the experiment. The numerical study shows that under all the conditions considered the model gives results close to the experiment, but there is an overestimation of the power required for ignition by up to two times. The study of the processes of ignition of gaseous mixtures by a subcritical microwave discharge is of interest for the design of propulsion systems with increased reliability, with the possibility of using hardly flammable mixtures. The proposed model gives approximate estimates, while the requirements for resources and time are significantly reduced compared to classical models.

Keywords

plasma ignition, numerical simulation, propane, gas dynamics, subcritical microwave discharge

Acknowledgements

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation during the implementation of the project “Creating a leading scientific and technical reserve in the development of advanced technologies for small gas turbine, rocket and combined engines of ultra-light launch vehicles, small spacecraft and unmanned aerial vehicles that provide priority positions for Russian companies in emerging global markets of the future”, No. FZWF-2020-0015.

For citation: Bulat P.V., Volkov K.N., Melnikova A.I., Renev M.E. Numerical model of a pulsed subcritical streamer microwave discharge for problems of plasma ignition of fuel mixtures in the gas phase. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 792–803 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-792-803

Введение

В настоящее время потенциал эволюционного развития аэрокосмической техники в значительной степени исчерпан. В связи с этим ведется активный поиск новых подходов и технологий. Одним из перспективных направлений считаются плазменные технологии. Например, для создания высокоскоростных летательных аппаратов требуется, чтобы их двигательная установка могла эффективно работать на больших скоростях. Чем больше скорость потока, тем сложнее обеспечить своевременное воспламенение топливной смеси. При этом на сверхзвуковых скоростях потока классический способ свечного поджига перестает работать. Один из способов поджига топливной смеси состоит в размещении искровых разрядников в полости, в которой скорость внешнего потока значительно уменьшается [1]. Однако такие полости создают сопротивление для внешнего потока. Имеет смысл исследовать более «мощные» типы разрядов, способные поджигать смесь, находясь в сверхзвуковом потоке.

Широко используемый поджиг искрами, горячей плазмой, характеризуется тем, что в относительно малом объеме смесь нагревается до температуры воспламенения, после чего выделяется энергия, и волна горения распространяется по всей камере сгорания. Такой подход к воспламенению смеси осложняется малым временем ее пребывания в рабочей камере при сверхзвуковых скоростях потока.

В неравновесной плазме, в которой основную роль играет горячий электронный газ, имеют место реакции диссоциации, возбуждения и ионизации частиц при низкой температуре среды [2], что значительно увеличивает скорость горения [3]. В работе [5] исследована возможность снижения выбросов вредных газов за счет использования неравновесной плазмы с увеличением полноты сгорания топливной смеси. Широко известно горение водорода в кислороде (водородная цепь) улучшено применением неравновесной плазмы путем дополнительных реакций диссоциации водорода, кислорода и водородно-кислородных радикалов [2]. В углеводородах необходимо учесть, что атомы водорода могут соединиться в молекулы путем отрыва пары от углеводородов [6].

Выявленный и подтвержденный многими исследованиями эффект увеличения скорости распространения пламени при наличии в области горения холодной неравновесной плазмы использован: в перспективных плазменных устройствах зажигания [3]; при подавлении высокочастотных колебаний в камере сгорания (режимов вибрационного горения) [7]; стабилизации горения в бедных [8] и «трудных» топливных смесях в малоэмиссионных газотурбинных двигателях и энергетических установках, работающих на органических отходах; предварительной ионизации компонентов топлива, подаваемых в камеру сгорания, что уменьшает задержку воспламенения и делает более благоприятным градиент температуры по длине камеры [9]. Для перечисленных случаев разработаны численные методы, основанные на термических эффектах и наличии в потоке электронного газа и свободных ионов [10, 11].

Предмет исследования

В ряде задач требуется рассчитать не только течение, содержащее холодную неравновесную плазму, но и ее источник. Например, оценить суммарную энергетическую эффективность установки. Широко распространены модели, в которых решены системы уравнений с законами сохранения рассматриваемых частиц, электронной энергии и электродинамики. На практике необходимо учесть большое количество частиц и реакций, чтобы получить физически корректные результаты. Например, для задачи нагрева чистого азота сверхвысокочастотным (СВЧ) разрядом взяты в расчет не менее 56 реакций и 15 сортов частиц вместе с «дополнительной» температурой среды, описывающей колебательные состояния азота при неравновесном возбуждении [12]. О сложности полноценного расчета плазмы в среде даже без топлива свидетельствует и работа [13], в которой получены результаты согласованного расчета наносекундного межэлектродного разряда. В [14] рассмотрены различные типы нагрева среды плазмой. В результате можно поставить задачу о необходимости учета значительного количества частиц и реакций для точных оценок.

Проведен ряд исследований по получению неравновесной плазмы с помощью электродной системы [11]. Подобные разряды уменьшают задержку воспламенения, позволяя сократить размеры камеры сгорания газотурбинных двигателей [9] и увеличить импульс жидкостных ракетных двигателей, что подтверждено результатами численных расчетов [15]. В связи с этим возможно использовать наносекундные импульсы напряжения, чтобы разряд не перешел в горячую фазу. Отметим, что применение электродов для создания высокой напряженности поля требует лишь источника напряжения достаточной мощности. Использование острых электродов позволяет снизить напряжение пробоя и обеспечить возникновение разряда на острие.

Диэлектрические барьеры [16, 17] повышают подаваемую мощность на электроды без повреждения установки, но при этом необходимо обеспечить разрядку барьеров, иначе прекратится протекание электрического тока. В ходе протекания тока одной полярности происходит зарядка диэлектриков и снижение напряженности электрического поля в плазме. Такие разряды часто используются в установках снижения выбросов на электростанциях.

Отдельно отметим, что поджиг жидких углеводородов неравновесной плазмой сильно затруднен: электронный газ достигает при подаче энергии извне высоких температур благодаря высокой подвижности электронов, редко взаимодействующих с остальными частицами в газообразной среде, но, попав в жидкость, они сразу теряют это свойство. Авторами считается, что можно достичь поджига неравновесной плазмой за счет использования пламени с большим количеством свободных радикалов от небольшого количества газообразного топлива и плазмой для нагрева и активации сложных углеводородов. Например, согласно работе [18], керосин активно взаимодействует с гидроксильной группой — атомами водорода.

Имеет важное значение исследование задач создания детонационных волн для перспективных детонационных ракетных двигателей [19]. Для получения высоких энергий и удельного импульса требуется, с одной стороны, использование высококалорийного топлива, а с другой — топливная смесь должна иметь возможность детонировать. В тонком слое фронта детонационной волны происходит быстрое выделение энергии и сгорание топливной смеси, что приводит к возможности работы двигательной установки на высоких скоростях с пониженными потерями теплоты через стенки камеры и уменьшенными вредными выбросами. Использование неравновесной плазмы позволяет повысить детонационную способность топливной смеси. В работе [20] показано, что СВЧ-плазма экономичнее и быстрее, чем искровой разряд, поджигает пропано-воздушную смесь.

Приближенные модели значительно проще, чем полноценные модели со строгой постановкой, и позволяют проводить расчеты за меньшее время с малыми затратами ресурсов. У таких моделей меньше точность, и они предоставляют меньше данных, требуя использования специальных приближений. Данные модели позволяют сделать предварительные оценки возможности получения тех или иных эффектов, выбрав наиболее перспективные комбинации входных параметров. В работе [4] предложено количество активных частиц в потоке, а в [21] заданы размеры предварительно нагретой области, что позволяет исследовать изменение параметров сверхзвукового обтекания. В работе [3] для исследования плазменного поджига с использованием одностадийной реакции без учета плазмохимии применен такой же подход.

Цель работы — построение приближенной математической модели плазмы и ее воздействия на топливную смесь, которую планируется в дальнейшем применить для расчета плазменного горения в присутствии подкритического СВЧ-разряда — разряда электрической плазмы, полученного на тонком инициаторе под воздействием СВЧ-излучения. Для уменьшения расходуемой мощности излучателя использованы фокусирующие системы и тонкие антенны, которые фокусируют излучение, локально повышая напряженность электрического поля, создаваемую излучением. В результате, при заданной электропрочности (минимальной напряженности поля для создания плазмы) возможно получить плазму, имея излучение с недостаточной напряженностью до фокусировки. Для разряда нужны затравочные электроны. Они могут образовываться, например, при воздействии солнечной радиации. Затравочные электроны разгоняются в электромагнитном поле и накапливают энергию для реакций ионизации. Важная особенность разработанной модели состоит в зависимости плазменных эффектов от параметров СВЧ-системы (нагрева и дополнительного набора реакций), достигаемой за счет дополнительных предварительных этапов моделирования. Подкритический СВЧ-разряд характеризуется объемным воздействием, достигая высоких концентраций электронов [22]. Использование пропана объяснено наличием надежных подробных схем горения (используется Grimech 3.0).

Условия среды, при которых исследуются особенности горения пропано-воздушных смесей, определены экспериментами из работы [3], используемые для верификации модели. Параметры выполнения работы: давление 13 кПа и температура 150 К окружающей среды, которая движется со скоростью до 500 м/с, обтекая специальную полую антенну-инициатор; через полость подается топливная смесь с заданным давлением избытка и составом (стехиометрическая смесь с давлением 100 кПа, чистый пропан — 20 кПа); на антенну падает СВЧ-излучение с длиной волны 12,5 см и мощностью 3 кВт.

Математическая модель

Модель для расчета плазменного поджига газобразных смесей углеводородов с воздухом за счет импульсного СВЧ-разряда с неравновесной плазмой вблизи инициатора построена на основе схемы расщепления по физическим процессам и состоит из трех этапов (рис. 1).

Этап 1. Расчет функции распределения электронной энергии (ФРЭЭ), зависимостей коэффициентов реакций с участием электронов как функций амплитуды внешнего электрического поля при заданных частоте, количественной плотности среды, составе среды и зависимостей сечений таких реакций от энергии электрона.

Этап 2. Расчет в трехмерной постановке распространения СВЧ-излучения в присутствии фокусирующих систем, антенны, заданной проводящей области «плазма» вблизи антенны. Решены уравнения Гельмгольца для монохромного излучения. Основная искомая величина — распределение электрического поля в плазме, по которому вычислены локальные значения коэффициентов реакций, а также мощность джоулевого нагрева. Локальные значения усреднены по области «плазма» и использованы на Этапе 3. Плазменные эффекты зависят от конкретной мощности СВЧ-излучения, геометрии и состояния среды.

Этап 3. Расчет газодинамики горения в присутствии области «плазма» с дополнительным набором реакций и заданной удельной мощностью нагрева. Решены уравнения газодинамики для сжимаемой среды и законы сохранения сортов частиц.

Разделение модели на разные этапы позволяет существенно сократить потребление вычислительных ресурсов, времени вычислений и происходит за счет использования специальных приближений.

Допущения и приближения. Плазма СВЧ-разряда — неравновесна. Большинство реакций ионизации с повышением проводимости происходят за счет горячего электронного газа низкой плотности. Внешний источник питания — импульсный, соответственно плазма не успевает перейти в равновесную стадию.

Плазма образуется и приобретает устойчивое значение проводимости и форму в течение нескольких микросекунд и далее ее поддерживает. Благодаря этому допускается задание плазмы извне с параметрами, основанными на экспериментальной статистике.

Состояние электронного газа определено локальным значением амплитуды электрического поля. При



Рис. 1. Модель с расщеплением по физическим процессам.

Жирным шрифтом обозначены: входные параметры; результаты расчета этапов для использования на следующих этапах и итоговые результаты расчетов.

Курсивом — параметры, которые необходимо перебирать в ходе решения этапов.

НЭП — напряженность электрического поля; *ПП* — плазменные параметры

Fig. 1. The setup of the three-stage model used in this study.

The following are indicated in bold: input parameters; the results of the calculation of the stages to be used in the next stages and the final results of the calculations.

Italics — parameters that need to be sorted out during the solution stages.

НЭП — electric field strength; *ПП* — plasma parameters

этом состав среды считается постоянным. Небольшие изменения состава среды (менее 1 %, до поджига) пренебрежимо слабо меняют ФРЭЭ и значения коэффициентов плазменных реакций.

На данном этапе развития модели не учтены реакции фотоионизации. Плазменные эффекты без фотоионизации ожидаются менее интенсивными.

Этап 1. Решим стационарные кинетические уравнения Больцмана для однородного электронного газа в среде во внешнем осциллирующем электрическом поле с заданной амплитудой для поиска равновесной ФРЭЭ. Используем метод конечных элементов — построим сетку базисных функций в одномерном пространстве электронной энергии.

Уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергиям имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial \epsilon} \left(W F_e - D \frac{\partial F_e}{\partial \epsilon} \right) = \sum S_{in}, \quad (1)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2|e|}{m_e}},$$

$$W = -\gamma \epsilon^2 \sum \sigma(\epsilon),$$

$$D = \frac{\gamma}{3} E_N^2 + \frac{\gamma k_B T_g}{|e|} \epsilon^2 \sigma(\epsilon),$$

где E_N — приведенный модуль амплитуды электрического поля; ϵ — энергия электрона; F_e — ФРЭЭ; W и D — коэффициенты подвижности и диффузии электронной энергии в пространстве энергий; S_{in} — мощности охлаждения электронного газа неупругими реакциями с участием электронов; γ — электронный параметр; $\sigma(\epsilon)$ — зависимости сечений реакций от кинетической энергии электронов из базы данных Ixcat, а также работы [6]; T_g — температура среды; k_B — постоянная Больцмана; $|e|$ — элементарный заряд, m_e — масса электрона.

Электронный газ нагревается внешним осциллирующим электрическим полем, электроны соударяются с частицами среды. В правой части уравнения (1) учитываются потери энергии электронов на реакции в среде. Определим коэффициент подвижности электронной энергии с помощью сечений соударений, а диффузии — нагревом внешнего электрического поля и взаимодействием со средой.

Используем естественные граничные условия для вычисления ФРЭЭ при следующих правилах: не существует электронов с отрицательной кинетической энергией и, следовательно, невозможно их взаимодействие с электронами, у которых энергия больше нуля, также не существует электронов с бесконечной энергией

$$\frac{\partial F_e}{\partial \epsilon} \Big|_{\epsilon=0} = 0, \quad F_e \Big|_{\epsilon=\epsilon_{\max}} = 0$$

В численном расчете считается, что нет электронов с достаточно большой энергией ϵ_{\max} (выбрано значение 150 эВ).

При расчете ФРЭЭ применим приведенные параметры внешнего электрического поля, нормированные на

количественную плотность среды N_g , вычисленную из уравнения состояния идеального газа:

$$N_g = \frac{p_g}{k_B T_g}, E_N = \frac{E}{N_g}, f_N = \frac{f_{MW}}{N_g},$$

где p_g — давление среды; E и f_{MW} — модуль амплитуды и частота электрического поля; f_N — приведенный модуль частота электрического поля.

Рассмотрим на Этапе 1 реакции с участием электронов: упругие соударения, возбуждения, ионизации, диссоциации и прилипания. Исследуемые частицы среды: азот, кислород, пропан.

Для численного решения уравнения (1) построим сетку из 3000 линейных элементов в пространстве энергии от 0 до 150 эВ с коэффициентом увеличения размера элемента 10. Итеративно подберем стационарное распределение электронов по энергии таким образом, чтобы полный источник электронной энергии и потоки в пространстве энергии были равны нулю. Итеративный процесс начнем с максвелловского распределения со средней энергией 2 эВ. Последовательность приближений выполним по методу Ньютона–Рафсона до тех пор, пока не будет получен заданный уровень невязки 10^{-8} .

Рассчитаем коэффициенты реакций k_{ei} по заданным сечениям и ФРЭЭ

$$k_{ei} = \gamma \int_0^{\infty} \epsilon \sigma_e(\epsilon) F_e(\epsilon) d\epsilon. \quad (2)$$

Коэффициенты (2) вычислим для ряда значений амплитуды электрического поля, которые оказываются табличными зависимостями от этого поля. Данные коэффициенты необходимы для постобработки решения на Этапе 2.

Этап 2. Решим уравнения Гельмгольца для монохромного СВЧ-излучения при наличии проводящей области:

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(1 - \frac{i\sigma_{cond}}{2\pi f_{MW} \epsilon_0} \right) \mathbf{E} &= 0, \\ \mathbf{B} &= -\frac{1}{2\pi i f_{MW}} [\nabla \times \mathbf{E}], \end{aligned} \quad (3)$$

где ∇ — оператор набла; $\mathbf{E}(x, y, z)$ — вектор напряженности электрического поля; $\mathbf{B}(x, y, z)$ — вектор магнитной индукции; k_0 — волновой вектор в открытом пространстве; i — мнимая единица; σ_{cond} — проводимость среды (не равна нулю в плазме); ϵ_0 — электрическая постоянная.

Зададим область «плазма» исходя из экспериментальной статистики, при этом четко видно, где возникает плазма, какая ее форма и примерное значение проводимости или концентрации зарядов. В модели учтен инструмент проверки плазмы на возможность ее существования с точки зрения сравнения реакций, повышающих и понижающих проводимость, а также уточняющий свойства плазмы. При этом целесообразно сделать перебор нескольких параметров плазмы, например длину и концентрацию электронов в ней.

По заданной концентрации электронов в плазме, а также их подвижности при известной количественной плотности среды и известном составе плазмы определим ее проводимость для уравнения (3):

$$\sigma_{cond} \equiv |e|(b_e n_e + \sum_i |z_i|^2 b_i n_i) \approx |e| b_e n_e,$$

где b_e и b_i — подвижности электронов и ионов в электрическом поле в среде; z_i — зарядовое число иона. Ионы на два порядка менее подвижны, имеют сопоставимую концентрацию (плазма квазинейтральная), поэтому их вкладом можно пренебречь.

Для расчета распространения СВЧ-излучения (3) в фокусирующей системе в модели учтены следующие элементы: инициатор и зеркальная поверхность под ним, плазма с заданными свойствами и зона входа для СВЧ-излучения. Геометрия для расчета СВЧ-поля показана на рис. 2. В данном случае плазма представляет шесть цилиндров, расположенных на конце инициатора — окружности с равномерным распределением по ней.

Уравнения (3) дополним граничными условиями. Инициатор и зеркало идеально отражают излучение, поэтому:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0,$$

где \mathbf{n} — вектор нормали поверхности.

Для экономии вычислительных ресурсов решим половину модели. На плоскости симметрии зададим условие нулевой касательной компоненты электрического поля, которое имеет вид:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{B} = 0.$$

Над инициатором установим условие входа для излучения через площадь 100 см^2 (для половины модели 50 см^2) с заданной поляризацией и мощностью. Электрическое поле направлено вдоль инициатора и имеет амплитуду E_0 , следовательно:

$$\mathbf{E} = E_0 \mathbf{e}_x.$$

На остальных границах определено условие рассеяния второго порядка

$$\mathbf{n} \times (\nabla \times (\mathbf{E})) - ik_0 \mathbf{n} (\mathbf{E} \times \mathbf{n}) - \frac{1}{2ik_0} \nabla \times (\mathbf{n} \nabla \times \mathbf{E}) = 0.$$

Для решения уравнений (3) Этапа 2 построим сетку со следующими параметрами: на расстоянии от малых объектов выбраны размеры элементов с характерной длиной до 1/5 от длины волны. Вблизи малых объектов сетка сгущается так, чтобы не менее шести элементов были расположены в узких промежутках, таких как диаметр плазмоида. Выберем квадратичные элементы — 600 тыс. элементов. Используем геометрический многосеточный метод решения разностных уравнений на основе V-цикла. Создадим дополнительно сетку с уменьшенным в два раза количеством элементов.

Вычислим средние значения коэффициентов реакций k_{je}^n с участием частиц среды j и электронов, удель-

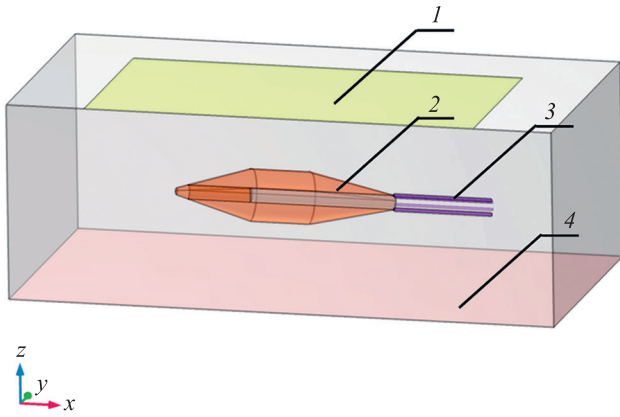


Рис. 2. Используемая геометрия для расчета СВЧ-поля. 1 — зона входа СВЧ-излучения; 2 — антенна; 3 — область «плазма»; 4 — отражающая плоскость; xz — плоскость симметрии (условие отсутствия касательной компоненты магнитной индукции); остальные границы (условие свободного прохождения излучения второго порядка)

Fig. 2. The studied geometry for MW-field calculation (1 — MW-radiation input zone, 2 — initiator, 3 — plasma domain, 4 — mirror-plane, xz — plane of symmetry — a condition of zero tangential magnetic field; the rest boundaries — a condition of second order open boundary)

ную мощность джоулева нагрева W_{joule} по области «плазма» Ω_{plas} и оператор интегрирования $\hat{I}(A)$:

$$\hat{I}(A) \stackrel{def}{=} \iiint_{\Omega_{plas}} A dx, \quad (4)$$

$$W_{joule} = \frac{\hat{I}(\mathbf{j}, \mathbf{E})}{\hat{I}(1)},$$

$$k_{je}^n = \frac{\hat{I}(k_{je}^n(|\mathbf{E}|))}{\hat{I}(1)},$$

где A — некоторая полевая функция, к которой применяется оператор интегрирования; dx — элементарный объем; \mathbf{j} — плотность тока проводимости.

Выполним проверку плазмы на возможность ее существования. Рассмотрим различные плазмоиды, и введем критерий баланса электронов — разницу между всеми скоростями реакций ионизации, рекомбинации и прилипания. Если при заданных условиях баланс электронов B меньше нуля, то плазма не существует, существенно больше нуля — плазма развивается. Если плазма с положительным балансом, близким к нулю, то она максимально развита, и ее необходимо выбрать. Введем скорость реакции частиц i, j с заданными молярными долями w :

$$S_{ij}^n = k_{ij}^n n_i n_j, \quad n_i = N_e w_i.$$

Тогда получим суммарные скорости всех реакций ионизации $S^{\sigma+}$ с участием электронов и прилипания:

$$S^{\sigma+} = \sum_{n \in \{\sigma+\}} i, j; S_{ie}^n, \quad S^{e-} = \sum_{n \in \{e-\}} i, j; S_{ie}^n,$$

где $\{\sigma+\}$ и $\{e-\}$ — множества реакций типа ионизации и прилипания соответственно. Вычислим реакцию

рекомбинации $S^{\sigma-}$ по известному коэффициенту рекомбинации $C^{\sigma-}$ в приближении квазинейтральности. Типичное значение коэффициента рекомбинации равно $10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$.

$$S^{\sigma-} = C^{\sigma-} n_e n_i = [n_e = n_i] = C_{rec} n_e^2.$$

В результате имеем:

$$B = S^{\sigma+} - S^{e-} - S^{\sigma-}.$$

Этап 3. Решим уравнения газодинамики в пакете Ansys FLUENT для сжимаемой среды в осесимметричной постановке. Для проверки модели поджига выполним сравнение с экспериментальными данными. В среде присутствуют частицы воздуха, пропана, промежуточных и конечных продуктов горения (схемы реакций Grimech 3.0). Используем модель турбулентности $k-\epsilon$ со стандартными для пакета Ansys FLUENT параметрами. При этом средняя мощность джоулева нагрева (4) задана равномерно в области «плазма». Примем, что плазма неподвижна, значит в плазме известное количество электронов и ионов, ранее полученное на Этапе 2 сохранится. Чтобы не вводить новые частицы (электроны и ионы) и не переделывать значительно схему реакций, а также не настраивать их источники, они не рассматриваются явно. Вместо этого коэффициенты реакций умножаются на концентрации таких частиц, а реакции, начиная с этого этапа считаются одночастичными, а не двухчастичными и происходят только в домене плазма. С технической точки зрения это упрощенный аналог «замороженных» частиц в среде.

Рассмотренные реакции с участием ионов — реакции обмена заряда, сопровождающиеся диссоциацией частиц, при этом коэффициенты реакций взяты из работы [23].

Используем сетку с характерным размером элемента 0,1 мм и элементами второго порядка, и неявную разностную схему первого порядка. Решим переходную задачу до получения стационарного решения. Шаг по времени составляет 2 мкс.

Геометрия и граничные условия показаны на рис. 3. По инициатору-форсунке подается топливная смесь пропана с воздухом, сама форсунка обдувается чистым воздухом.

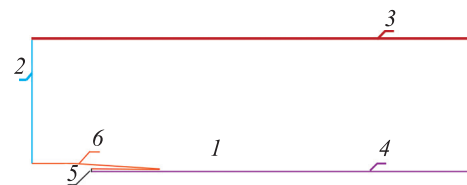


Рис. 3. Геометрия для расчета газодинамики горения в присутствии области «плазма» (1).

Граничные условия: 2 и 3 — вход и выход для внешнего потока воздуха; 4 — ось симметрии; 5 — вход для топливной смеси; 6 — стенка (антенна)

Fig. 3. Geometry to study gas dynamics of propane-air flame in case of plasma domain (1).

Boundary conditions: 2 — inlet, exterior flux of air, 3 — outlet, 4 — symmetry axis, 5 — inlet, fuel mixture, 6 — wall condition (initiator)

Анализ результатов

Проверим трехэтапную приближенную модель СВЧ-поджига газообразных смесей с воздухом по имеющимся экспериментальным данным.

Анализ результатов Этапов 1 и 2. На Этапе 1 выполнены расчеты кинетических уравнений (1) для электронов в пространстве энергии. Электроны нагреты внешним СВЧ-полем, их амплитуда изменяется параметрически, и они могут совершать упругие столкновения, а также реакции возбуждения, диссоциации и ионизации частиц среды.

Отметим важный результат: основные плазменные реакции — диссоциация кислорода и пропана с образованием отдельных атомов, молекулы водорода, целой молекулы метана или его радикала. При этом возможна ионизация частиц одновременно с диссоциацией. Подобные реакции приводят к заметной плазменной конверсии пропана, к плазменному поджигу (вместе с диссоциацией молекулы кислорода), и к поддержке проводимости плазмы. На Этапе 2 вычислено распространение СВЧ-излучения при наличии антенны. После получения результатов для разных проводимостей плазмы и ее длины (l) выполнена проверка баланса реакций (рис. 4). В результате баланс уменьшился и имеет отрицательное значение при увеличении длины и проводимости плазмы (не показаны на рис. 4), так как сложнее ее поддерживать при заданной мощности СВЧ.

Выберем плазму с параметрами: длина 6 мм, концентрация электронов 10^{20} $1/\text{м}^3$. Проведем оценку коэффициентов реакций при суммарной по всем сортам частиц удельной мощности нагрева 220 $\text{ГВт}/\text{м}^3$. Отметим, что только 67 % мощности джоулева нагрева ионов и электронного газа будет приложено к среде, так как часть энергии рассеивается.

Анализ результатов Этапа 3. На Этапе 3 осуществлено сравнение результатов расчета газодинамики в присутствии области «плазма» с данными экспериментов из работы [3]. В результате эксперимента получены фотографии пламени при следующих условиях: давление среды 13 кПа, температура 150 К, внешний поток воздуха 85–500 м/с, который подается через ан-

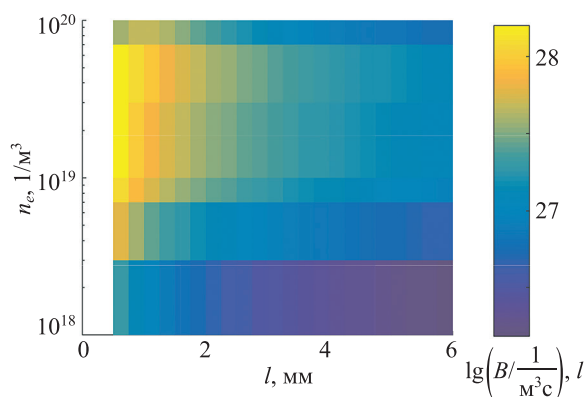


Рис. 4. Зависимость десятичного логарифма функции баланса от длины плазмоида и концентрации электронов

Fig. 4. The Balance Decimal logarithm values at different plasma lengths and electron concentrations

тенну. На выходе получена стехиометрическая смесь пропан-воздух с избыточным давлением 101 кПа или чистый пропан — 20,2 кПа. Фотографии пламени при данных условиях были сопоставлены с результатами численного моделирования, выполненного при тех же условиях, и добавлены комментарии о наблюдаемых особенностях пламени.

Рассмотрим три экспериментальных случая с различными параметрами.

Случай 1: скорость внешнего потока воздуха 85 м/с, через инициатор подается стехиометрическая смесь. Фотография пламени и результаты расчета (поля температуры и модуля скорости движения) показаны в таблице. На фотографии видно, что имеется область свечения, обусловленная наличием возбужденных частиц. Свечение имеет яркий фиолетовый оттенок — излучают частицы с высоким уровнем возбуждения, характерным для неравновесной плазмы. Такие частицы могут образовываться в плазме, затем диффузионно распространяться. Также наблюдается рассеивание свечения в среде. Иными словами, область фиолетового свечения, видимая в эксперименте, должна быть не меньше, чем область действия плазмы, и предположительно пламени. По фотографии можно сказать, что ее длина составляет примерно половину высоты конусной задней части инициатора. Пламени пропана (голубое свечение) не видно, значит, область горения находится внутри области фиолетового свечения.

В результате расчета получены поля температуры и скорости движения среды с подходящими под эксперимент особенностями: на выходе инициатора происходит горение с повышением температуры до 20 кК и с расширением среды со скоростью до 1,2 км/с. Указанные области имеют размер около 1/3, 1/2 от высоты конусной части инициатора, а их форма близка к овальной. Заметим, что результаты расчета для описываемых условий не противоречат эксперименту. Аналогично проанализируем случаи использования стехиометрической смеси и чистого пропана таблица при скорости внешнего потока 500 м/с.



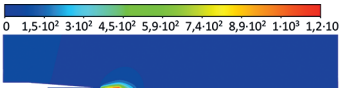

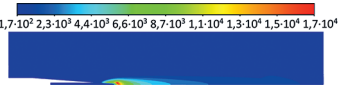
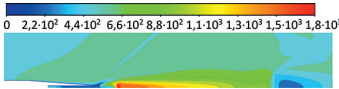

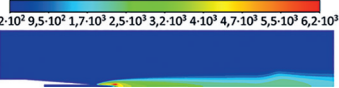
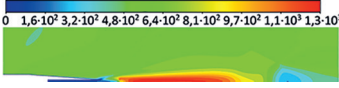
Случай 2: в таблице видно, что в сверхзвуковом потоке область свечения смещена от инициатора, в остальном особенности аналогичны случаю скорости потока 85 м/с. Результаты расчетов согласуются с экспериментом: имеется пламя, область повышенной температуры меньше области яркого свечения.

Отметим случай 3 — горение при подаче чистого пропана при скорости внешнего потока 500 м/с. Пропана достаточно, чтобы было четко видно пламя в большом объеме вне области фиолетового свечения. Длина пламени сопоставима с высотой конуса инициатора. Распределение температуры по данным моделирования: имеется длинная струя с высокой температурой порядка 2 кК, которая снижается при движении газа от плазмы в направлении выхода. В эксперименте в этом же направлении снижается интенсивность свечения пламени.

На рис. 5 приведены зависимости интегральных потоков ряда продуктов f сгорания и активных радикалов через самую правую границу модели от скорости внешнего потока V . Представлены данные для стехио-

Таблица. Фотографии из эксперимента для верификации модели и результаты расчета для случаев стехиометрической смеси и чистого пропана

Table. Photos from the experiment for model verification and calculation results for the cases of stoichiometric mixture and pure propane

Скорость внешнего потока, м/с	Фотография из эксперимента для верификации модели	Результаты расчета	
		распределение температуры, К	распределение модуля скорости, м/с
Случай 1 (подается стехиометрическая смесь)			
85			
Случай 2 (подается стехиометрическая смесь)			
500			
Случай 3 (подается чистый пропан)			
500			

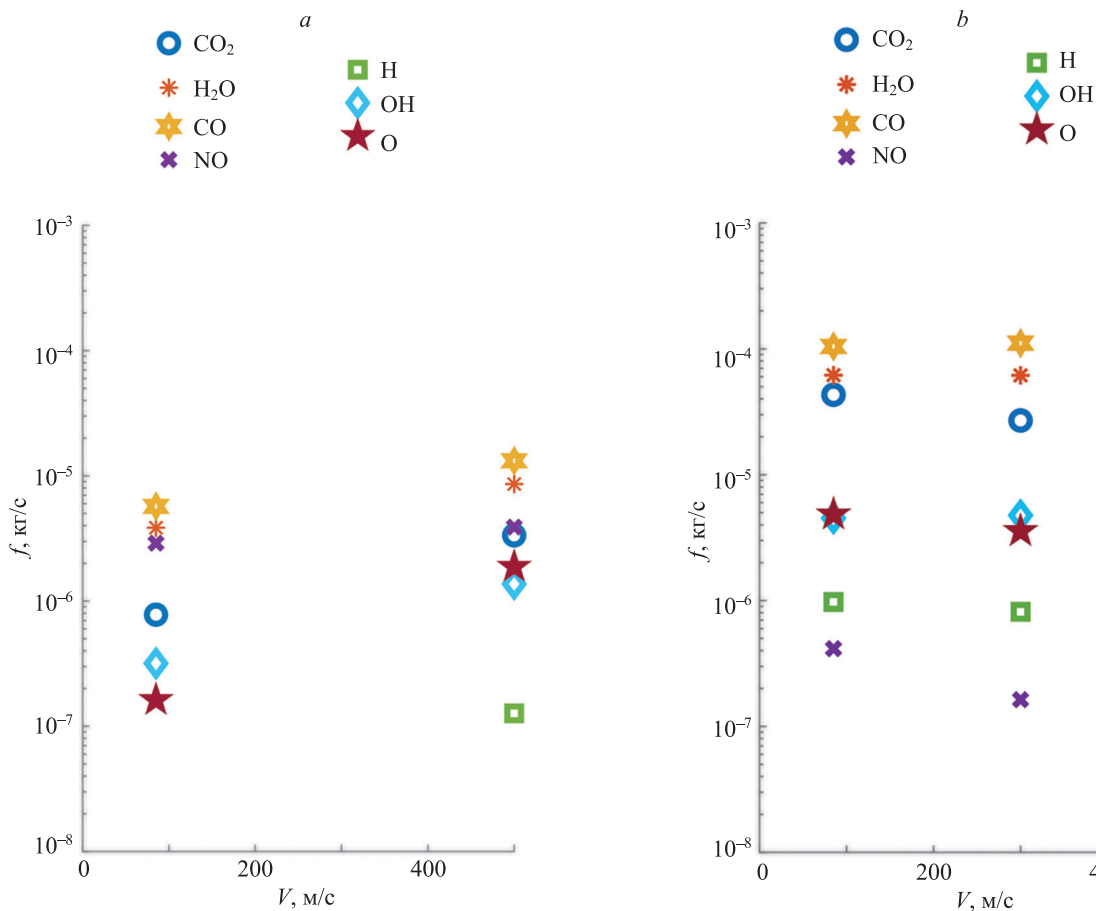


Рис. 5. Зависимость потока ряда продуктов сгорания через самую правую границу модели «выход» от скорости внешнего потока воздуха: стехиометрическая смесь (а) и чистый пропан (б)

Fig. 5. The dependence of the mass flux of a number of combustion products through the most right boundary “output” of the model vs. the speed of the external air flow: a stoichiometric mixture (a), pure propane (b)

метрической смеси и чистого пропана с избыточными давлениями 100 и 20 кПа соответственно.

В случае стехиометрической смеси при увеличении скорости внешнего потока увеличиваются и потоки продуктов сгорания и радикалов. Однако их концентрации в среде падают: увеличение потоков в 2–5 раз при увеличении скорости почти в 6 раз. Заметим, что имеется эффект эжекции, на большей скорости при заданном давлении подачи смеси, ее во внешнюю среду должно попадать больше. Следовательно, смесь не успевает прогореть, однако наблюдается факт горения.

Отметим, что при увеличении скорости внешнего обтекания получим увеличение потока атомарных кислорода и водорода на порядок. Данная особенность может быть полезна для применения системы как «плазменно-пламенного» факела для разогрева и «плазменной», тепловой конверсии сложных топливных смесей.

Если заменить стехиометрическую смесь на чистый пропан, то снова получим горение, а также на порядок больше атомарного водорода в потоке, но в меньшей степени увеличится количество атомарного кислорода и гидроксильной группы. Такое увеличение потоков связано с тем, что в расчетную область попадает больше пропана, содержащего водород. Плазма же воздействует лишь на него, подогревая и осуществляя конверсию при сильно пониженном содержании кислорода в потоке топливной струи. «Активированный» пропан (радикалы пропана, водород) на границе двух потоков (струя топлива, внешний поток воздуха) реагируют с кислородом. Происходят реакции, подобные водородной цепи, атомизируется кислород, образуется гидроксо-группа, но для этого нужно время, поэтому у таких двух веществ потоки не возрасли более, чем на порядок относительно случая стехиометрической смеси.

У воды, угарного и углекислого газовкратно увеличился поток при изменении смеси, поскольку в расчетной области существенно больше поступает пропана. При этом оксид азота образуется в меньшем количестве: плазма более не действует на внешний поток воздуха, не образует атомарные кислород, азот, которые затем соединятся в оксид. С точки зрения создания наиболее горячего пламени в значительном объеме с уменьшением выброса оксида азота, с увеличением количества активных радикалов горение чистого пропана во внешнем потоке воздуха перспективнее, чем стехиометрической смеси пропан-воздух.

В результате горения струи чистого пропана в потоке воздуха с дефицитом кислорода внутри струи пропана в продуктах сгорания образован сильно разогретый активизированный синтез-газ с высоким содержанием активных радикалов.

Имеет смысл дальнейшее исследование горения чистых газообразных топлив в потоке с окислителем для поджига смесей с жидким топливом (керосином) неравновесной плазмой через «посредника». Прямой

поджиг затруднителен — электроны быстро прилипают к каплям топлива.

Можно сделать вывод, что результаты моделирования приемлемо соотносятся с экспериментальными данными. Отсутствующая область фиолетового свечения в результате эксперимента объясняется неучтенными в расчете фотонами, остальные видимые особенности пламени и плазмы согласуются.

Заключение

Выполнены расчеты на основе трехэтапной приближенной модели поджига пропана в воздухе с помощью подкритического сверхвысокочастотного разряда. Результаты моделирования близки к экспериментальным данным. Модель верифицирована за счет сравнения полей температуры и концентраций различных сортов частиц с фотографиями из эксперимента других авторов. Для всех рассмотренных случаев выполнен поджиг топливной смеси.

Использована СВЧ-система со следующими параметрами: мощность излучения 3 кВт, длина волны излучения 12,5 см. При этом параметры среды: давление 13 кПа, температура 150 К, она движется с заданной скоростью движения относительно антенны-инициатора до 500 м/с. Через инициатор подается либо стехиометрическая смесь пропан-воздух, либо чистый пропан с избыточными давлениями 101 и 20 кПа.

Модель позволила осуществить анализ продуктов сгорания топливной смеси, сделать первичные оценки перед тем, как ставить эксперимент или численное моделирование, где будет более строго и согласованно решаться полная система уравнений плазгодинамики и горения. Например, один из интересных результатов — сгорание чистого пропана во внешнем потоке воздуха с образованием горячего сингаза со значительным количеством радикалов: атомы водорода, кислорода, гидроксильной группы. Такую топливную смесь, полагаем, можно использовать для «плазменно-газового» поджига смесей с жидким топливом, и это требует дальнейших исследований.

Отметим, что в работе использовано ключевое приближение: параметры и геометрия плазмы считаются известными. Это приводит к существенному снижению ресурсозатратности модели и времени расчета, поскольку не рассматриваются многочисленные уравнения переноса частиц на этапе расчета СВЧ-полей, требующие соблюдения критериев устойчивости. Допускается повторное использование результатов предложенных Этапов 1 и 2 моделирования для новых задач. В дальнейшем планируется добавить дополнительный этап оценки эффектов взаимодействия фотонов со средой, добавить модель роста стримеров, использовать упрощенную модель для предварительных оценок возможности создания детонационной волны в круглой трубе за счет интенсивного плазменного поджига.

Литература

References

- Feng R., Wang Z., Sun M., Wang H., Huang Y., Yang Y., Liu X., Wang C., Tian Y., Luo T., Zhu J. Multi-channel gliding arc plasma-assisted ignition in a kerosene-fueled model scramjet engine // *Aerospace Science and Technology*. 2022. V. 126. P. 107606. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107606>
- Starikovskaia S.M. Plasma assisted ignition and combustion // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2006. V. 39. N 16. P. R265–R299. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/16/R01>
- Bulat M.P., Bulat P.V., Denissenko P.V., Esakov I.I., Grachev L.P., Lavrov P.V., Volkov K.N., Volobuev I.A. Plasma-assisted ignition and combustion of lean and rich air/fuel mixtures in low- and high-speed flows // *Acta Astronautica*. 2020. V. 176. P. 700–709. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.04.028>
- Chen Q., Ge J., Zheng T., Che X., Nie W. The role of non-equilibrium plasma kinetic effect on GCH₄/GOX rocket engine combustion performance // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1707. P. 012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1707/1/012015>
- Kotel'nikov V.A., Kotel'nikov M.V., Filippov G.S. Electrical and physical parameters of plasma fluxes in exhaust from a liquid-propellant rocket engine // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018. V. 47. N 6. P. 488–494. <https://doi.org/10.3103/S1052618818060067>
- Janev R.K., Reiter D. Collision processes of C₂H_y and C₂H_y⁺ hydrocarbons with electrons and protons // *Physics of Plasmas*. 2004. V. 11. N 2. P. 780–829. <https://doi.org/10.1063/1.1630794>
- Zhou S., Nie W., Tian Y. High frequency combustion instability control by discharge plasma in a model rocket engine combustor // *Acta Astronautica*. 2021. V. 179. P. 391–406. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.11.010>
- Bulat M.P., Bulat P.V., Denissenko P.V., Esakov I.I., Grachev L.P., Volkov K.N., Volobuev I.A. Ignition of lean and stoichiometric air-propane mixture with a subcritical microwave streamer discharge // *Acta Astronautica*. 2018. V. 150. P. 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.11.030>
- Kim W., Cohen J. Plasma-assisted combustor dynamics control at ambient and realistic gas turbine conditions // *Proceedings of the ASME Turbo Expo*. 2017. V. 4A. P. V04AT04A037. <https://doi.org/10.1115/GT2017-63477>
- Bulat M., Bulat P., Denissenko P., Esakov I., Grachev L., Volkov K., Volobuev I. Numerical Simulation of ignition of premixed air/fuel mixtures by microwave streamer discharge // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2019. V. 47. N 1. P. 62–68. <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2869259>
- Sharma A., Subramaniam V., Solmaz E., Raja L. Fully coupled modeling of nanosecond pulsed plasma assisted combustion ignition // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2019. V. 52. N 9. P. 095204. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaf690>
- Saifutdinov A.I., Kustova E.V. Dynamics of plasma formation and gas heating in a focused-microwave discharge in nitrogen // *Journal of Applied Physics*. 2021. V. 129. N 2. P. 023301. <https://doi.org/10.1063/5.0031020>
- Biturin V.A., Bocharov A.N., Dobrovolskaya A.S., Kuznetsova T.N., Popov N.A., Filimonova E.A. Numerical modeling of pulse-periodic nanosecond discharges // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 2100. N 1. P. 012032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2100/1/012032>
- Popov N.A., Starikovskaia S.M. Relaxation of electronic excitation in nitrogen/oxygen and fuel/air mixtures: fast gas heating in plasma-assisted ignition and flame stabilization // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2022. V. 91. P. 100928. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100928>
- Zheng T., Che X., Li L., Chen C., Nie W., Li X. Numerical study of plasma assisted combustion for a rocket combustor using GCH₄/GOX as propellants // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 1064. P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1064/1/012013>
- Zheng Z., Nie W., Zhou S., Tian Y., Zhu Y., Shi T., Tong Y. Characterization of the effects of a plasma injector driven by AC dielectric barrier discharge on ethylene-air diffusion flame structure // *Open Physics*. 2020. V. 18. N 1. P. 58–73. <https://doi.org/10.1515/phys-2020-0008>
- Deng J., He L., Liu X., Chen Y. Numerical simulation of plasma-assisted combustion of methane-air mixtures in combustion chamber // *Plasma Science and Technology*. 2018. V. 20. N 12. P. 125502. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aacdef>
- Feng R., Wang Z., Sun M., Wang H., Huang Y., Yang Y., Liu X., Wang C., Tian Y., Luo T., Zhu J. Multi-channel gliding arc plasma-assisted ignition in a kerosene-fueled model scramjet engine. *Aerospace Science and Technology*, 2022, vol. 126, pp. 107606. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107606>
- Starikovskaia S.M. Plasma assisted ignition and combustion. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, vol. 39, no. 16, pp. R265–R299. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/16/R01>
- Bulat M.P., Bulat P.V., Denissenko P.V., Esakov I.I., Grachev L.P., Lavrov P.V., Volkov K.N., Volobuev I.A. Plasma-assisted ignition and combustion of lean and rich air/fuel mixtures in low- and high-speed flows. *Acta Astronautica*, 2020, vol. 176, pp. 700–709. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.04.028>
- Chen Q., Ge J., Zheng T., Che X., Nie W. The role of non-equilibrium plasma kinetic effect on GCH₄/GOX rocket engine combustion performance. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1707, pp. 012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1707/1/012015>
- Kotel'nikov V.A., Kotel'nikov M.V., Filippov G.S. Electrical and physical parameters of plasma fluxes in exhaust from a liquid-propellant rocket engine. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2018, vol. 47, no. 6, pp. 488–494. <https://doi.org/10.3103/S1052618818060067>
- Janev R.K., Reiter D. Collision processes of C₂H_y and C₂H_y⁺ hydrocarbons with electrons and protons. *Physics of Plasmas*, 2004, vol. 11, no. 2, pp. 780–829. <https://doi.org/10.1063/1.1630794>
- Zhou S., Nie W., Tian Y. High frequency combustion instability control by discharge plasma in a model rocket engine combustor. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 179, pp. 391–406. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.11.010>
- Bulat M.P., Bulat P.V., Denissenko P.V., Esakov I.I., Grachev L.P., Volkov K.N., Volobuev I.A. Ignition of lean and stoichiometric air-propane mixture with a subcritical microwave streamer discharge. *Acta Astronautica*, 2018, vol. 150, pp. 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.11.030>
- Kim W., Cohen J. Plasma-assisted combustor dynamics control at ambient and realistic gas turbine conditions. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2017, vol. 4A, pp. V04AT04A037. <https://doi.org/10.1115/GT2017-63477>
- Bulat M., Bulat P., Denissenko P., Esakov I., Grachev L., Volkov K., Volobuev I. Numerical Simulation of ignition of premixed air/fuel mixtures by microwave streamer discharge. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 1, pp. 62–68. <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2869259>
- Sharma A., Subramaniam V., Solmaz E., Raja L. Fully coupled modeling of nanosecond pulsed plasma assisted combustion ignition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, vol. 52, no. 9, pp. 095204. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaf690>
- Saifutdinov A.I., Kustova E.V. Dynamics of plasma formation and gas heating in a focused-microwave discharge in nitrogen. *Journal of Applied Physics*, 2021, vol. 129, no. 2, pp. 023301. <https://doi.org/10.1063/5.0031020>
- Biturin V.A., Bocharov A.N., Dobrovolskaya A.S., Kuznetsova T.N., Popov N.A., Filimonova E.A. Numerical modeling of pulse-periodic nanosecond discharges. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2100, no. 1, pp. 012032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2100/1/012032>
- Popov N.A., Starikovskaia S.M. Relaxation of electronic excitation in nitrogen/oxygen and fuel/air mixtures: fast gas heating in plasma-assisted ignition and flame stabilization. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2022, vol. 91, pp. 100928. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100928>
- Zheng T., Che X., Li L., Chen C., Nie W., Li X. Numerical study of plasma assisted combustion for a rocket combustor using GCH₄/GOX as propellants. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1064, pp. 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1064/1/012013>
- Zheng Z., Nie W., Zhou S., Tian Y., Zhu Y., Shi T., Tong Y. Characterization of the effects of a plasma injector driven by AC dielectric barrier discharge on ethylene-air diffusion flame structure. *Open Physics*, 2020, vol. 18, no. 1, pp. 58–73. <https://doi.org/10.1515/phys-2020-0008>
- Deng J., He L., Liu X., Chen Y. Numerical simulation of plasma-assisted combustion of methane-air mixtures in combustion chamber. *Plasma Science and Technology*, 2018, vol. 20, no. 12, pp. 125502. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aacdef>

18. Zettervall N., Fureby C., Nilsson E.J.K. A reduced chemical kinetic reaction mechanism for kerosene-air combustion // *Fuel*. 2020. V. 269. P. 117446. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117446>
19. Ma J.Z., Luan M.Y., Xia Z.-J., Wang J.-P., Zhang S.-J., Yao S.-B., Wang B. Recent progress, development trends, and consideration of continuous detonation engines // *AIAA Journal*. 2020. V. 58. N 12. P. 4976–5035. <https://doi.org/10.2514/1.J058157>
20. Bulat P.V., Chernyshov P., Esakov I.I., Grachev L., Lavrov P., Melnikova A.I., Volkov K.N., Volobuev I.A. Multi-point ignition of air/fuel mixture by the initiated subcritical streamer discharge // *Acta Astronautica*. 2022. V. 194. P. 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.09.043>
21. Dobrov Y.V., Lashkov V.A., Mashek I.Ch., Khoronzhuk R.S. Investigation of heat flux on aerodynamic body in supersonic gas flow with local energy deposition // *AIP Conference Proceedings*. 2018. V. 1959. P. 050009. <https://doi.org/10.1063/1.5034637>
22. Булат П.В., Есаков И.И., Грачев Л.П., Денисенко П.В., Булат М.П., Волобуев И.А. Математическое и компьютерное моделирование горения и детонации подкритическим стримерным разрядом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 4. С. 569–592. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-4-569-592>
23. Kossyi I.A., Kostinsky A.Yu., Matveyev A.A., Silakov V.P. Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures // *Plasma Sources Science and Technology*. 1992. V. 1. N 3. P. 207–220. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/1/3/011>
18. Zettervall N., Fureby C., Nilsson E.J.K. A reduced chemical kinetic reaction mechanism for kerosene-air combustion. *Fuel*, 2020, vol. 269, pp. 117446. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117446>
19. Ma J.Z., Luan M.Y., Xia Z.-J., Wang J.-P., Zhang S.-J., Yao S.-B., Wang B. Recent progress, development trends, and consideration of continuous detonation engines. *AIAA Journal*, 2020, vol. 58, no. 12, pp. 4976–5035. <https://doi.org/10.2514/1.J058157>
20. Bulat P.V., Chernyshov P., Esakov I.I., Grachev L., Lavrov P., Melnikova A.I., Volkov K.N., Volobuev I.A. Multi-point ignition of air/fuel mixture by the initiated subcritical streamer discharge. *Acta Astronautica*, 2022, vol. 194, pp. 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.09.043>
21. Dobrov Y.V., Lashkov V.A., Mashek I.Ch., Khoronzhuk R.S. Investigation of heat flux on aerodynamic body in supersonic gas flow with local energy deposition. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1959, pp. 050009. <https://doi.org/10.1063/1.5034637>
22. Bulat P.V., Esakov I.I., Grachev L.P., Denissenko P.V., Bulat M.P., Volobuev I.A. Modeling and simulation of combustion and detonation by subcritical streamer discharge. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 569–592. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-4-569-592>
23. Kossyi I.A., Kostinsky A.Yu., Matveyev A.A., Silakov V.P. Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures. *Plasma Sources Science and Technology*, 1992, vol. 1, no. 3, pp. 207–220. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/1/3/011>

Авторы

Булат Павел Викторович — доктор физико-математических наук, кандидат экономических наук, главный научный сотрудник, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация, [sc 55969578400](https://orcid.org/0000-0003-0099-9953), <https://orcid.org/0000-0003-0099-9953>, pavelbulat@mail.ru

Волков Константин Николаевич — доктор физико-математических наук, лектор Университет Кингстона, Лондон, SW15 3DW, Великобритания; ведущий научный сотрудник, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация, [sc 8663950000](https://orcid.org/0000-0001-6055-2323), <https://orcid.org/0000-0001-6055-2323>, k.volkov@kingston.ac.uk

Мельникова Анжелика Игоревна — младший научный сотрудник, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация, [sc 57222383655](https://orcid.org/0000-0001-7229-0965), <https://orcid.org/0000-0001-7229-0965>, angelika044@gmail.com

Ренев Максим Евгеньевич — младший научный сотрудник, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация; аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация, [sc 57211271545](https://orcid.org/0000-0002-0583-0607), <https://orcid.org/0000-0002-0583-0607>, renevme@mail.ru

Authors

Pavel V. Bulat — D. Sc. (Physics and Mathematics), PhD (Economics), Chief Researcher, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation, [sc 55969578400](https://orcid.org/0000-0003-0099-9953), <https://orcid.org/0000-0003-0099-9953>, pavelbulat@mail.ru

Konstantin N. Volkov — D. Sc. (Physics and Mathematics), Senior Lecturer, Kingston University, London, SW15 3DW, United Kingdom; Leading Researcher, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation, [sc 8663950000](https://orcid.org/0000-0001-6055-2323), <https://orcid.org/0000-0001-6055-2323>, k.volkov@kingston.ac.uk

Anzhelika I. Melnikova — Junior Researcher, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation, [sc 57222383655](https://orcid.org/0000-0001-7229-0965), <https://orcid.org/0000-0001-7229-0965>, angelika044@gmail.com

Maksim E. Renev — Junior Researcher, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; PhD Student, St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation, [sc 57211271545](https://orcid.org/0000-0002-0583-0607), <https://orcid.org/0000-0002-0583-0607>, renevme@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.05.2022
Одобрена после рецензирования 17.06.2022
Принята к печати 28.07.2022

Received 15.05.2022
Approved after reviewing 17.06.2022
Accepted 28.07.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»