

УДК 537.523:538.4

В. Ш. АВЕДЯН, А. А. ТРОПИНА*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина***МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ
ИМПУЛЬСНЫМИ РАЗРЯДАМИ**

Рассмотрена задача о стабилизации пламени коротко-импульсными разрядами. Проведен анализ возможных механизмов влияния плазмы разряда на стабилизацию турбулентного горения обедненной топливно-воздушной смеси. Предложена модель плазменного разряда, как теплового источника, интенсивность которого прямо пропорциональна мощности разряда и части энергии разряда, переданной на нагрев смеси. В рамках предложенной модели было получено, что тепловой механизм действия наносекундного разряда объясняет наблюдаемые в эксперименте различные режимы горения и переход между ними. Показано, что наблюдаемое в экспериментах распределение радикалов не может быть объяснено в рамках тепловой модели плазмы разряда.

Ключевые слова: параметр, математическое моделирование, турбулентное горение, стабилизация пламени, наносекундный разряд, плазма, тепловой источник.

Введение

Все более ужесточающиеся требования к снижению токсичности различных транспортно-энергетических установок приводят к тому, что вопросам организации экологически чистого процесса горения в литературе уделяется очень много внимания. В частности, одним из самых распространенных методов снижения концентрации оксидов азота является организация горения обедненной топливно-воздушной смеси. Снижение адиабатической температуры сгорания в этом случае автоматически гарантирует снижение концентрации токсических компонент-оксидов азота, формирующихся в рамках теплового механизма Зельдовича. Однако подобное решение задачи снижения токсичности приводит к целому комплексу проблем, связанных с организацией воспламенения и устойчивого горения обедненной смеси. Одним из методов решения возникающих проблем является воздействие на пламя различного рода разрядов, т.е. организация процесса воспламенения и горения, стимулированного плазмой. Лидером в аэрокосмических приложениях такого процесса горения по праву считается наносекундный импульсный разряд, особенно с появлением новых генераторов на основе дрейфовых диодов [1], однако вопрос о понимании механизмов действия наносекундного разряда на процесс стабилизации турбулентного горения обедненной предварительно-перемешанной топливно-воздушной смеси на сегодняшний день является открытым.

Анализ исследований и публикаций

Наиболее полно современное состояние теории процесса горения, стимулированного плазмой различного рода разрядов, изложено в обзоре [2]. Авторы анализируют богатый экспериментальный материал, накопленный в этой области за последние десятилетия, и отмечают, что использование коротко-импульсных разрядов позволяет при минимуме вложенной энергии обеспечить организацию высокоэффективного и экологически чистого процесса горения.

В работе [3] авторы приводят данные экспериментов по обеспечению стабильного горения обедненной пропано-воздушной смеси за счет воздействия наносекундного импульсного разряда, генерирующего плазму в области рециркуляции. Отмечается, что стабильный процесс турбулентного горения в присутствии разряда реализуется даже для состава смеси ниже минимального предела воспламеняемости. Аналогичный вывод демонстрируется результатами работы [4], но для ламинарного метано-воздушного пламени.

Можно отметить, что эффект стабилизации достигается не только для случая горения предварительно-перемешанной смеси, как в работах [3,4], но и при диффузионном горении [5]. Один из механизмов влияния разрядной плазмы на процесс горения связан с увеличением нормальной скорости распространения пламени [6]. Однако, несмотря на богатый экспериментальный материал по стабилизации процесса горения различного рода разрядами, механизмы такого влияния изучены недостаточно, что

объясняется трудностями разделения тепловых, химических и неравновесных эффектов плазмы в экспериментах. В таком случае одним из способов проведения исследования является математическое моделирование.

В настоящий момент публикаций, посвященных моделированию процессов стабилизации турбулентного пламени плазменными разрядами, в литературе нет. Среди обзорных работ, посвященных описанию турбулентного горения предварительно перемешанных смесей можно отметить обзорные статьи [7,8]. Опираясь на данные в этих работах рекомендации по выбору модели турбулентности и выбору замыкающих соотношений для скорости реакции горения в турбулентном потоке, проведем оценку механизмов влияния плазмы на стабилизацию процесса турбулентного горения.

Постановка задачи

Рассмотрим случай турбулентного горения частично перемешанной смеси со стабилизацией пламени плохообтекаемым телом и плазмой, формируемой наносекундным импульсным разрядом в области рециркуляции. Рассматривая разряд в филаментном режиме, предположим, что его действие на пламя определяется нагревом смеси в области формирования плазменного канала. В таком случае действие плазмы можно моделировать тепловым источником в уравнении для переноса энтальпии.

Основная система уравнений, описывающая процесс турбулентного горения в рамках $k-\varepsilon$ модели турбулентности с учетом перемежаемости имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau_t), \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho z) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho z u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial z}{\partial x_j} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) + S_p, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tau_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} S_{ij} - c_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \theta)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \theta) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) + \dot{\omega}_\theta, \quad (7)$$

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

$$\tau_{ij} = 2\mu \left(S_{ij} - \frac{S_{nn} \delta_{ij}}{3} \right), \quad \tau_{tij} = -\overline{\rho u_i u_j},$$

$$\theta = \sum_{i=1}^n Y_i / \sum_{i=1}^n Y_{i,ad}, \quad \tau_{ij} = \tau_{ijj} + \tau_{tij}, \quad S_p = \alpha \frac{P_d}{V_p},$$

где θ - переменная, задающая положение фронта пламени,

z - концентрация инертной примеси,

τ_{ij} - тензор напряжений,

μ_t - турбулентная вязкость,

k - кинетическая энергия турбулентности,

ε - скорость диссипации кинетической энергии турбулентности,

$\dot{\omega}_\theta$ - скорость химической реакции горения в турбулентном потоке, которая замыкается в рамках модели Брея [7],

S_p - источниковый член, моделирующий действие разряда,

P_d - мощность разряда,

V_p - объем, занятый плазмой,

α - часть энергии разряда, переданная на нагрев смеси.

Остальные обозначения общепринятые.

Результаты расчетов

Задача решалась численно в осесимметричной постановке. Основные детали вычислительной схемы и модификаций метода SIMPLE для расчета процесса воспламенения и горения, стимулированного разрядной плазмой, приведены в работе [9]. Геометрия расчетной области представлена на рис. 1 (размеры указаны в мм) и соответствует реальной геометрии эксперимента работы [3]. Одним из электродов (катодом) является плохообтекаемое тело, анодом является цилиндрическая проволока над

катодом. Предварительно-перемешанная смесь подается через выпускную форсунку горелки (обозначенную на рис. 1, как входная граница). Коэффициент $\alpha = \text{const}$ для всех режимов горения выбирался на основе данных экспериментальных замеров поступательной температуры смеси, приведенных в работе [3]. Влиянием колебательно-поступательной релаксации среды пренебрегали, рассматривая стационарный процесс стабильного поддержания пламени. Расчеты проводились для случая горения обедненной пропано-воздушной смеси с эквивалентным соотношением в пределах $\Phi = 0,5 \div 0,8$. Можно отметить, что значение $\Phi = 0,5$ лежит ниже нижнего предела воспламеняемости для этой смеси, т.е. без действия наносекундного импульсного разряда смесь данного состава не горит.

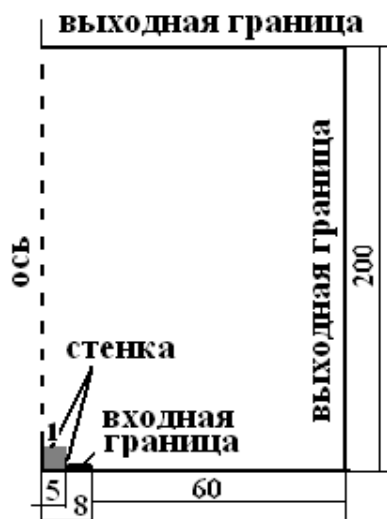


Рис. 1. Расчетная область

Этот экспериментальный вывод подтверждается данными расчетов. Соответственно, можно утверждать, что основным механизмом стабилизации пламени наносекундным импульсным разрядом при турбулентном горении ультра-бедной смеси является тепловой механизм. При этом формирование плазменного канала предполагается в области рециркуляции. В модели это влияние задается источником членом S_p при мощности разряда $P_d = 75 \text{ Вт}$.

Для оценки возможного нагрева смеси в области рециркуляции за счет действия разряда на рис. 2. приведены расчетные профили температуры смеси в рециркуляционной зоне, примыкающей к плохо-обтекаемому телу (стенка 1 на рис. 1). Число Рейнольдса рассчитывалось по внешнему диаметру выпускной форсунки горелки (входная граница на рис. 1).

Можно отметить, что с увеличением числа Рейнольдса влияние плазмы разряда на процесс нагрева смеси снижается, что напрямую связано со снижением времени пребывания смеси в рециркуляционной зоне и, соответственно, со временем воздействия плазменного источника на топливно-воздушную смесь. Таким образом, при увеличении числа Рейнольдса для обеспечения эффекта стабилизации пламени мощность разряда должна быть увеличена.

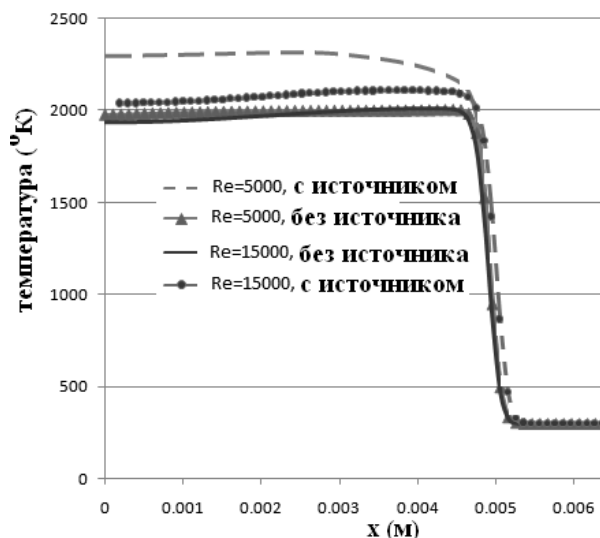


Рис. 2. Профили температуры в рециркуляционной зоне

В работе [3] авторы приводят экспериментально наблюдаемые данные о существовании трех режимов горения в зависимости от состава смеси, контролируемого эквивалентным соотношением Φ . На рис. 3 приведены расчетные режимы горения в присутствии плазмы разряда (мощность разряда выбрана $P_d = 75 \text{ Вт}$) в зависимости от эквивалентного соотношения смеси при числе Рейнольдса $Re=10000$. Сравнивая данные расчетов с данными эксперимента работы [3], получаем, что все полученные в расчетах режимы горения соответствуют наблюдаемым экспериментальным режимам, что служит дополнительным аргументом в пользу теплового механизма действия разряда на стабилизацию пламени.

В тоже время расчетные зависимости радикалов, в частности радикала ОН, не отражают экспериментально наблюдаемое расширение области, занятой этими радикалами, при действии разряда. По нашему мнению, это напрямую связано с ограничениями теории замыкания скорости реакции в турбулентном потоке, когда концентрация компонент смеси после нахождения положения фронта пламени согласно уравнению (7) определяется на

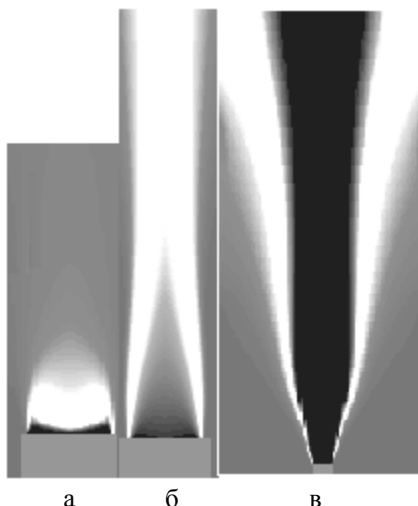
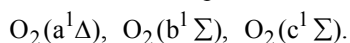


Рис. 3. Переход между режимами горения ($Re=10000$): а – пилотное пламя ($\Phi=0,5$), б – прерывистое пламя ($\Phi=0,7$), в – пламя V-образной формы ($\Phi=0,7$)

основе табулированных данных для ламинарного одномерного пламени. Эти данные, объединенные в библиотеки, не содержат плазменных компонент, наличие которых может существенно изменить кинетику реакций горения. Таким образом, дальнейшее усовершенствование модели турбулентного горения, стимулированного разрядной плазмой, заключается в разработке новых табулированных библиотек одномерных ламинарных пламен с учетом кинетики реакций с плазменными компонентами, в частности с долгоживущими электронно-возбужденными состояниями кислорода



Выводы

Предложена математическая модель стабилизации турбулентного пламени газоразрядной плазмой наносекундного импульсного разряда. Получено, что основным механизмом перехода между режимами горения при стабилизации пламени является тепловой механизм нагрева смеси в области рециркуляции.

Поступила в редакцию 20.11.2013, рассмотрена на редколлегии 11.12.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедры информационных технологий и мехатроники О. П. Алексеев, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков

Литература

1. Tropina, A. A. Nanosecond pulsed discharge: modeling and practical implementation in internal combustion engines [Text] / A. A. Tropina, D. V. Vilchinskiy // Abstracts of the International Internet-conference "Mathematical modeling of applied problems of mathematics, physics, mechanics". – Kharkov (Ukraine). – 2013. – P. 18-20.
2. Plasma assisted combustion [Text] / Yu. Starikovskii, N. B. Anilin, I. N. Kosarev, E. I. Mintousov, S. M. Starikovskaia, V. P. Zhukov // Pure and Applied Chemistry. – 2006. – Vol. 78. – P. 1265-1298.
3. Stabilization of a turbulent premixed flame using a nanosecond repetitively pulsed plasma [Text] / G. Pilla, D. Galley, D.A. Lacoste, F. Lacas, D. Veynante, C. O. Laux // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2006. – Vol. 34, № 10. – P. 2471-2477.
4. Plasma-assisted stabilization of laminar premixed methane/air flames around the lean flammability limit [Text] / M. S. Bak, H. Do, M. G. Mungal, M. A. Capitelly // Combustion and Flame. – 2012. – Vol. 159, Issue 10. – P. 3128-3137.
5. A study of plasma-stabilized diffusion flames at elevated ambient temperature [Text] / W. Kim, H. Do, M.G. Mungal, M.A. Cappelli // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2008. – Vol. 36. – P. 2898-2904.
6. Measurements of combustion properties in a microwave enhanced flame [Text] / E. S. Stockman, S. H. Zaidi, R. B. Miles, C. D. Carter, M. D. Ryan // Combustion and Flame. – 2009. – Vol. 156, Issue 7. – P. 1453-1461.
7. Analysis of algebraic closures of the mean scalar dissipation rate of the progress variable applied to stagnating turbulent flames [Text] / H. Q. Dong, V. Robin, A. Mura, M. Champion // Flow, Turbulence, Combustion. – 2013. – Vol. 90. – P. 301-323.
8. Numerical simulation of a premixed turbulent V-shaped flame [Text] / M. I. Khazen, H. Benticha, F. Demoulin, A. Jemni // Thermal Science. – 2011. – Vol. 15. – P. 311-320.
9. Tropina, A. A. Non-equilibrium plasma influence on the minimum ignition energy. Part 1: Discharge model [Text] / A. A. Tropina, M. Uddi, Y. Ju // IEEE Trans. on Plasma Sci. – 2011. – Vol. 39, № 1. – P. 615-623.

МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТУ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПОЛУМ'Я ІМПУЛЬСНИМИ РОЗРЯДАМИ

В. Ш. Аведян, А. А. Тропіна

Розглянуто задачу про стабілізацію полум'я короткими-імпульсними розрядами. Проведено аналіз можливих механізмів впливу плазми розряду на стабілізацію турбулентного горіння збідненої паливно-повітряної суміші. Запропоновано модель плазмового розряду, як теплового джерела, інтенсивність якого прямо пропорційна потужності розряду й частини енергії розряду, переданої на нагрівання суміші. У рамках запропонованої моделі було отримано, що тепловий механізм дії наносекундного розряду пояснює спостережувані в експерименті різні режими горіння й перехід між ними. Показано, що розподіл радикалів, який спостерігається в експериментах не може бути пояснено в рамках теплової моделі плазми розряду.

Ключові слова: математичне моделювання, турбулентне горіння, стабілізація полум'я, наносекундний розряд, плазма, теплове джерело.

MODELING OF THE FLAME STABILIZATION BY PULSED DISCHARGES

V. Sh. Avedyan, A. A. Tropina

A problem of the flame stabilization by short-pulsed discharges has been considered. An analysis of the possible mechanisms of the plasma discharge influence on the stabilization of the turbulent combustion of the lean fuel-air mixture has been carried out. It has been proposed, a plasma discharge model as a heat source with the intensity, which is proportional to the discharge power and the part of the discharge energy going to the mixture heating. In the frame of the proposed model it was obtained that the heat mechanism of the nanosecond pulsed discharge action could explain different combustion modes and transition between them, which were observed in the experiments. It has been shown that the experimentally observed radicals distribution could not be explained by the heat model of the discharge plasma.

Key words: mathematical modelling, turbulent combustion, flame stabilization, nanosecond discharge, plasma, heat source.

Аведян Валерій Шаликович – науч. сотр. кафедры прикладной математики, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков, Украина, e-mail: v.avedyan@mail.ru.

Тропина Альбина Альбертовна – д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой прикладной математики, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков, Украина, e-mail: albina.tropina@fulbrightmail.org.