

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ ИМПУЛЬСНЫМИ РАЗРЯДАМИ

В.Ш. Аведян, м.н.с., соискатель, А.А. Тропина, профессор, д.т.н., ХНАДУ

***Аннотация.** Рассмотрена задача о стабилизации пламени коротко-импульсными разрядами. Проведен анализ возможных механизмов влияния плазмы разряда на стабилизацию турбулентного горения обедненной топливно-воздушной смеси. В рамках предложенной тепловой модели было получено, что тепловой механизм действия наносекундного разряда объясняет наблюдаемые в эксперименте различные режимы горения и переход между ними.*

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

МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТУ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПОЛУМ'Я ІМПУЛЬСНИМИ РОЗРЯДАМИ

В.Ш. Аведян, м.н.с., пошукувач, А.А. Тропіна, професор, д.т.н., ХНАДУ

***Анотація.** Розглянуто задачу про стабілізацію полум'я короткими-імпульсними розрядами. Проведено аналіз можливих механізмів впливу плазми розряду на стабілізацію турбулентного горіння збідненої паливно-повітряної суміші. У рамках запропонованої теплової моделі було отримано, що тепловий механізм дії наносекундного розряду пояснює спостережувані в експерименті різні режими горіння й перехід між ними.*

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

MODELING OF THE FLAME STABILIZATION BY PULSED DISCHARGES

V. Avedyan, researcher, A. Tropina, professor, dr. eng. sc., KhNAHU

***Abstract.** 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. In the frame of the proposed heat 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.*

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

Введение

Все более ужесточающиеся требования к снижению токсичности различных транспортно-энергетических установок приводят к тому, что вопросам организации экологиче-

ски 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 адиа-

батической 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 технических приложениях такого процесса горения по праву считается наносекундный импульсный разряд, 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 [1]. Авторы анализируют богатый экспериментальный материал, накопленный в этой области за последние десятилетия, и отмечают, что использование короткоимпульсных разрядов позволяет при минимуме вложенной энергии обеспечить организацию высокоэффективного и экологически чистого процесса горения.

В работе [2] 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 [3], но для ламинарного метано-воздушного пламени.

Можно отметить, что эффект стабилизации достигается не только для случая горения предварительно-перемешанной смеси, как в работах [2,3], но и при диффузионном горении [4]. Одним из механизмов влияния разрядной плазмы на процесс горения связан с

увеличением нормальной скорости распространения пламени [4]. 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 [6,7]. 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 перемешанности имеет вид:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

где θ – переменная, задающая положение фронта пламени, $\dot{\omega}_\theta$ – скорость химической реакции горения в турбулентном потоке, которая замыкается в рамках модели Брея [6], 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 общеприняты.

Результаты расчетов

Задача решалась численно в осесимметричной постановке. Основные детали вычислительной схемы и метода SIMPLE приведены в работе [8]. Геометрия расчетной области представлена на рис.1 и соответствует реальной геометрии эксперимента работы [2]. Одним из электродов (катодом) является плохобтекаемое тело, анодом является цилиндрическая проволочка над катодом. Предварительно-перемешанная смесь подается через выпускную форсунку горелки (обозначенную на рис.1., как входная граница). Коэффициент $\alpha = const$ для всех режимов горения выбирался на основе данных экспериментальных замеров поступательной температуры смеси, приведенных в работе [2]. 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.

Этот экспериментальный вывод подтверждается данными расчетов. Соответственно, в этом случае основным механизмом стабилизации пламени наносекундным импульсным разрядом при турбулентном горении ультраобедненной смеси является тепловой механизм.

На рис.2. приведены расчетные профили температуры смеси в рециркуляционной зоне, примыкающей к плохобтекаемому телу. В этой же области формируется плазменный канал, влияние которого задается источниковым членом S_p .

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, с временем воздействия плазменного источника на топливно-воздушную смесь.



Рис. 1. Расчетная область

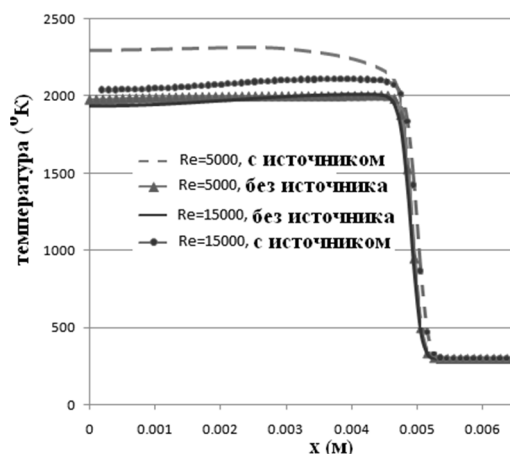


Рис. 2. Профили температуры в рециркуляционной зоне

На рис.3 приведены расчетные режимы горения в присутствии плазмы в зависимости от эквивалентного соотношения смеси при числе Рейнольдса $Re=10000$, рассчитанном по внешнему диаметру выпускной форсунки.

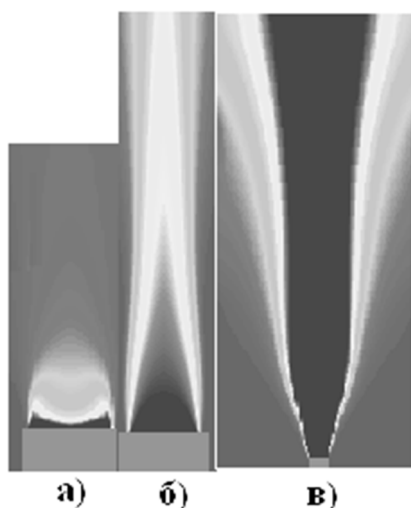


Рис. 3. Переход между режимами горения ($Re=10000$): а) пилотное пламя ($\Phi=0,5$), б) прерывистое пламя ($\Phi=0,7$), в) пламя V-образной формы ($\Phi=0,7$).

Все полученные в расчетах режимы горения соответствуют наблюдаемым режимам в эксперименте [2], что служит дополнительным аргументом в пользу теплового механизма действия разряда на стабилизацию пламени.

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.

Литература

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

Рецензент: О.П. Алексієв, професор, д.т.н., ХНАДУ

Стаття надійшла до редакції 2 листопада 2013 р.