

УДК 537.523:538.4

А.А. ТРОПИНА

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина

МИНИМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПРИ ЗАЖИГАНИИ ИМПУЛЬСНЫМ НАНОСЕКУНДНЫМ РАЗРЯДОМ

Предложена модель процесса ламинарного горения смеси и расчета минимальной энергии воспламенения для случая воспламенения неравновесной плазмой наносекундного импульсного разряда при атмосферном давлении. Модель основана на уравнениях переноса для многокомпонентной реагирующей смеси совместно с уравнениями для поступательной и колебательной температур. Получены данные о зависимости минимальной энергии воспламенения от длительности импульса и состава смеси. Проведена оценка вклада колебательного возбуждения смеси наносекундным импульсом в минимальную энергию воспламенения.

Ключевые слова: наносекундный импульсный разряд, минимальная энергия воспламенения, неравновесная плазма, численное моделирование

Введение

Известно, что при воспламенении горючей смеси количество подведенной к газу энергии должно превысить некоторое определенное минимальное значение. Минимальная энергия воспламенения является одним из фундаментальных понятий теории горения и характеризует минимальное количество энергии, которое необходимо подвести к газу, чтобы обеспечить самоподдерживающийся режим горения. В литературе существуют альтернативные определения минимальной энергии воспламенения (МЭВ), в частности, МЭВ часто определяют как минимальное количество энергии, необходимое для нагрева слоя газа, толщина которого равна толщине фронта ламинарного пламени до температуры адиабатического фронта пламени, или как минимальное количество энергии искрового разряда, необходимое для воспламенения данного состава смеси при данных условиях. Большинство экспериментальных и расчетных данных по минимальной энергии воспламенения относятся к случаю искрового воспламенения. В тоже время, появление альтернативных источников воспламенения, таких как лазерная искра, микроволновой разряд, наносекундный импульсный разряд, вызывает целый ряд вопросов, так или иначе, связанных с минимальной энергией воспламенения.

1. Анализ последних публикаций

Определение основных закономерностей процесса воспламенения является задачей одинаково важной, как для фундаментальных исследований

теории процессов горения, так и для прикладных задач. Минимальная энергия воспламенения, как один из основных показателей процесса воспламенения, зависит от многих факторов, среди которых можно выделить зависимость от состава смеси, давления, способа воспламенения и гидродинамических характеристик. Наиболее изученным как в теоретическом, так и в экспериментальном плане, является минимальная энергия воспламенения при зажигании смеси искровым разрядом. Экспериментально установлено, что в таком случае МЭВ зависит от свойств электрической цепи, длительности разряда и межэлектродного расстояния. Если межэлектродное расстояние меньше, так называемого гасящего расстояния, то минимальная энергия воспламенения начинает зависеть от формы и размеров электродов. В настоящее время стандартные экспериментальные методы определения минимальной энергии воспламенения горючих веществ [1] основываются на измерениях МЭВ при воспламенении искровым разрядом, на методе впервые предложенным в работе [2]. Точность таких измерений оценивается в пределах $\pm 10\%$ для МЭВ и $\pm 2\%$ для гасящего расстояния. Также экспериментально установлено [3], что минимальная энергия воспламенения зависит от числа атомов углерода в молекуле топлива, достигая минимума для обедненной метановоздушной смеси, а по мере роста числа атомов углерода в молекуле топлива, минимум МЭВ переходит в область обогащенных смесей.

Для большинства углеводородных топлив экспериментальные значения МЭВ согласно [2] лежат в пределах 0,2-0,3 мДж. Впрочем, в литературе можно найти экспериментальные данные [4, 5], в кото-

рых эти значения намного выше. Учитывая то, что процесс воспламенения является случайным процессом и подчиняется законам теории вероятностей, значения минимальной энергии воспламенения должны существенно зависеть от вероятности воспламенения. Последняя в экспериментах [2] не приведена, но может быть оценена как 1-2%. Повышение вероятности воспламенения существенно повышает значения измеряемой минимальной энергии воспламенения, чем и можно объяснить различия в измеряемых значениях энергии воспламенения, приведенных различными авторами.

Среди классических теоретических работ, посвященных вычислению МЭВ, можно отметить работы [6-8]. В работе [6] авторы моделировали искровой разряд источником тепловой энергии и источником энергии в виде продуктов диссоциации кислорода и метана. Полученные значения минимальной энергии воспламенения изменялись в пределах $0,5 \div 0,8$ мДж в зависимости от состава метановоздушной смеси. Авторы отмечают незначительное влияние изменения способа ввода энергии на МЭВ. В работе [7] авторы, моделируя искровой разряд источником тепловой энергии, получили значения минимальной энергии воспламенения порядка 0,005 мДж при минимальном радиусе ядра пламени $r_{ig} = 0,0635$ мм и времени воспламенения $\tau_{ig} = 27,5$ мкс. Отмечается существенное влияние r_{ig} и τ_{ig} на минимальную энергию воспламенения, а значения МЭВ, близкие к экспериментальным, авторы получают при минимальном радиусе ядра пламени порядка межэлектродного расстояния. В работе [8] приведены результаты исследований влияния геометрии электродов, межэлектродного расстояния и продолжительности разряда на минимальную энергию воспламенения.

В работе [9] приведены результаты расчетов МЭВ для водородовоздушной смеси, авторы отмечают существенное влияние времени ввода тепловой энергии на рассчитанные значения МЭВ. В работе [10] авторы, моделируя источник тепловой энергии функцией Гаусса, и, принимая в качестве радиуса минимального очага воспламенения гасящее расстояние, получили удовлетворительное согласование рассчитанных значений минимальной энергии воспламенения с экспериментальными данными, приведенными в монографии [2]. Среди последних работ, посвященных феномену МЭВ, можно отметить работу [11], где авторы приводят экспериментальные данные о зависимости минимальной энергии воспламенения от уровня пульсаций скорости. Показано, что переход между различными режимами горения предварительно-перемешанной смеси может быть определен по изменению харак-

тера зависимости минимальной энергии воспламенения от уровня пульсаций скорости.

Данные по измерению минимальной энергии воспламенения при зажигании, отличным от искрового разряда, довольно малочисленны. Так, для случая воспламенения лазерным разрядом согласно экспериментальным данным, приведенным в работе [12], значения минимальной энергии воспламенения выше, чем при воспламенении искровым разрядом, кроме того, значения МЭВ существенно зависят от длительности, энергии, длины волны лазерного импульса и фокусного расстояния линз. Основной причиной увеличения минимальной энергии воспламенения при воспламенении лазерным импульсом является, по-видимому, очень короткая продолжительность импульса, вследствие чего часть вводимой энергии теряется в процессе формирования и распространения ударной волны.

В последние годы в литературе появились работы, в которых авторы обсуждают возможные преимущества использования горения, стимулированного неравновесной плазмой наносекундного импульсного разряда, в различных приложениях, например, в камерах сгорания сверхзвуковых самолетов [13] или в двигателях внутреннего сгорания [14, 15]. Недавние работы в этом направлении продемонстрировали возможность снижения периода задержки воспламенения в сверхзвуковых течениях с помощью неравновесной плазмы импульсного наносекундного разряда [16, 17].

Однако, несмотря на усиливающийся интерес к проблемам горения, стимулированного неравновесной плазмой, до сих пор неясным остается вопрос о механизмах влияния неравновесной плазмы на минимальную энергию воспламенения. Экспериментальное определение минимальной энергии воспламенения в данном случае очень затруднено. Автору известна только одна работа [18], где приводится оценка энергии воспламенения наносекундным импульсным разрядом при атмосферном давлении, однако условия эксперимента не позволяют сделать вывод о том, что эта измеренная энергия является минимальной. В таком случае, на первый план выходит численное моделирование.

2. Цель и постановка задачи

Для ответа на вопрос о влиянии неравновесной плазмы на минимальную энергию воспламенения рассмотрим задачу распространения ламинарного пламени. Основные уравнения, описывающие процесс ламинарного горения, представляют собой уравнения переноса для многокомпонентной реагирующей смеси. Они дополняются уравнением переноса поступательной и колебательной температуры

газа, которые в безразмерных переменных имеют вид:

$$c_p \rho \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \theta \right) = (\text{Pr} \cdot \text{Re})^{-1} \nabla \lambda^* \cdot \nabla \theta + G_{VT} \frac{E_v(\theta_v) - E_0(\theta)}{\tau_{VT}} + \frac{1}{\text{Re}} \text{div} \left(\rho \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\text{Sc}_i} h_i \tilde{D}_i \nabla Y_i \right) \right) + \sum_{j=1}^r \rho^2 \text{Da}_j \varphi_j(\theta, \theta_v) \cdot h_j \cdot \tilde{W}(Y_j) \frac{dE_v}{dt} = (\text{Sc}_e \cdot \text{Re})^{-1} \nabla \cdot D_h \nabla E_v - G_{VT} \frac{E_v(\theta_v) - E_0(\theta)}{\tau_{VT}}$$

где E_0 – равновесная колебательная энергия,
 τ_{VT} – время колебательно-поступательной релаксации,
 E_v – неравновесная колебательная энергия,
 θ – поступательная температура газа,
 $\varphi_j(\theta, \theta_v)$ – константы скоростей реакций.

Остальные обозначения общепринятые.

Предлагается следующая процедура расчета минимальной энергии воспламенения. Задача делится на две части. На первом этапе выполняется расчет состава плазмы при заданных параметрах наносекундного импульса, согласно методике, приведенной в работах [17, 19]. Предполагается, что переносные свойства смеси являются замороженными, что обусловлено кратковременностью импульса по сравнению с характерными временами конвекции и диффузии. Выходными параметрами задачи на этом этапе являются состав плазмы, распределение колебательной и поступательной температур смеси, а также давление. Эти параметры плюс радиус начальной плазменной области в форме сферы являются входными параметрами для задачи плазменно-стимулированного горения. Энергия, вводимая в систему, заданием плазменной области, определяется как разница внутренних энергий смеси до и после ввода плазмы. Минимальная энергия воспламенения определяется при этом минимизацией радиуса плазменной области. Кинетическая схема и состав формирующейся неравновесной плазмы приведены в работах [17, 19].

Проанализируем влияние состава плазмы на внутреннюю энергию смеси при незначительном нагреве. Изменение внутренней энергии смеси в этом случае, если временно не принимать во внимание энергию, запасенную во внутренних степенях свободы, обусловлено вкладом стандартных химических потенциалов:

$$\Delta U = \sum_i \Delta \mu_i^0 N_i$$

Учитывая тот факт, что стандартные химические потенциалы атомов кислорода и водорода пре-

вышают аналогичные значения для радикалов OH, можно прогнозировать, что именно наличие в плазменной области атомов водорода и кислорода будет значительно увеличивать внутреннюю энергию системы, что, в свою очередь, будет снижать минимальную энергию воспламенения.

При численном решении задачи определения минимальной энергии воспламенения отдельным вопросом является вычисление переносных свойств смеси с плазменными компонентами. В рамках кинетического подхода значения коэффициентов диффузии, вязкости, теплопроводности определяются через сечения упругих столкновений. Вкладом в переносные свойства смеси поправок Эйкена, связанных с наличием возбужденных состояний молекул, пренебрегали вследствие невысоких температур ($T < 6000$ K). Таким образом, для вычисления коэффициентов вязкости $(\eta)_{ij}$, теплопроводности $(\lambda_t)_{ij}$ и диффузии $(D)_{ij}$ использовались следующие соотношения [20]:

$$(\lambda_t)_{ij} = 1989,1 \cdot 10^{-7} \left[T(M_i + M_j) / (2M_i M_j) \right]^{1/2} / \Omega_{i,j}^{(1,1)},$$

$$(\eta)_{ij} = 266,93 \cdot 10^{-7} \left[2T \cdot M_i M_j / (M_i + M_j) \right]^{1/2} / \Omega_{i,j}^{(2,2)},$$

$$(D)_{ij} = 0,002628 \left[T^3 (M_i + M_j) / (2M_i M_j) \right]^{1/2} / \rho \Omega_{i,j}^{(1,1)},$$

где M_i – масса i -й компоненты смеси,

$\Omega_{i,j}^{(2,2)}$ – интеграл столкновений вязкостного типа,

$\Omega_{i,j}^{(1,1)}$ – интеграл столкновений диффузионного типа.

Сечения столкновений между нейтральными компонентами смеси вычислялись с использованием потенциала Леннарда-Джонса, использовались аппроксимирующие полиномы, представленные в работе [21], вкладом столкновений электронов с нейтральными частицами, а также с положительными и отрицательными ионами пренебрегали вследствие низких концентраций электронов. При описании взаимодействия между заряженными компонентами использовался кулоновский потенциал

$$\varphi(r) = \pm \left(\frac{e^2 z_1 z_2}{r} \right) \exp(-r / \lambda_D),$$

где $\lambda_D = \left(\frac{kT}{4\pi n_e e^2} \right)$ – радиус Дебая,

z_1, z_2 – зарядовые числа ионов.

Взаимодействие между ионами и нейтральными компонентами описывалось с использованием поляризуемостей [22]:

$$(\lambda_t)_{ij} = 5,37 \cdot 10^{-7} T \left[(M_i + M_j) / (2M_i M_j) \right]^{1/2} / z / \alpha^{1/2},$$

$$(\eta)_{ij} = 1,02 \cdot 10^{-7} T \left[(M_i M_j) / (M_i + M_j) \right]^{1/2} / z / \alpha^{1/2},$$

$$(D)_{ij} = 6,177 \cdot 10^{-6} T^2 \times$$

$$\times \left[(M_i + M_j) / (2M_i M_j) \right]^{1/2} / z / p / \alpha^{1/2},$$

где α – поляризуемость.

В расчетах оценивалось влияние длительности импульса, колебательно-поступательной релаксации и колебательного возбуждения на минимальную энергию воспламенения. Оценка минимальной энергии воспламенения проводилась двумя способами: 1) как минимальное значение энергии, вводимой в систему, равное разнице внутренней энергии смеси до и после ввода плазмы, 2) согласно следующему соотношению, отражающему тепловой характер минимальной энергии воспламенения:

$$E_{\min} = \frac{4}{3} \pi r_{\min}^3 \rho_0 c_p (T_{ad} - T_0),$$

где ρ_0 – плотность исходной смеси,

c_p – средняя теплоемкость смеси,

T_{ad} – адиабатическая температура пламени,

r_{\min} – характерный размер.

Именно от выбора в качестве характерного размера толщины ламинарного фронта пламени, гасящего расстояния, радиуса шарика пламени зависят значения минимальной энергии воспламенения, получаемые в различных исследованиях.

3. Результаты расчетов

Результаты вычислений, проведенные по методике, изложенной выше, показали, что минимальная энергия воспламенения при зажигании плазмой наносекундного разряда повышается по сравнению со случаем теплового воспламенения. При выборе в качестве характерного размера области прогрева радиуса плазменной области, значения МЭВ больше расчетных значений МЭВ при тепловом воспламенении, приведенных в работе [7] (рис.1).

Учет эффекта усиления ионизации за счет колебательного возбуждения приводит к снижению минимальной энергии воспламенения на 15-17%. При выборе в качестве характерного размера области прогрева значений порядка гасящего расстояния приводит к тому, что значения минимальной энергии воспламенения приближаются к экспериментальным значениям МЭВ при воспламенении искрой, однако, по-прежнему, превышают их (рис. 2).

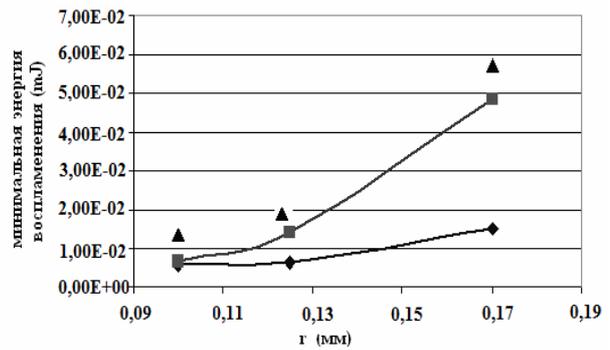


Рис. 1. Зависимость минимальной энергии воспламенения от радиуса области с вводимой энергией:

- ◆ – теплое воспламенение [7];
- – воспламенение неравновесной плазмой с учетом колебательного возбуждения;
- ▲ – воспламенение неравновесной плазмой без учета колебательного возбуждения

Эта закономерность сохраняется и при изменении вида топлива. Данные, приведенные на рис. 2, соответствуют случаю воспламенения обедненной смеси метана и этилена ($\Phi = 0,65$).

Уменьшение длительности наносекундного импульса при том же напряжении приводит к увеличению минимальной энергии воспламенения (рис. 2).

В первую очередь, это связано с увеличением плотности энергии при увеличении длительности импульса, как следствие, увеличивается как доля энергии, идущая на нагрев смеси, так и количество формируемых разрядом радикалов.

В тоже время, при одинаковой энергии импульса при уменьшении длительности импульса минимальная энергия воспламенения снижается (рис. 3, рис. 4, для импульсов длительности 70 нс и 25 нс соответственно). Обозначения на рис. 3 и рис. 4 совпадают.

Однако величина такого снижения минимальна для обедненной смеси, поскольку большая часть вводимой энергии теряется в процессе формирования ударной волны, интенсивность которой для случая малой длительности импульса и высокой плотности вводимой энергии превышает аналогичные значения для более протяженного импульса.

Было получено, что для всех рассмотренных случаев минимальная энергия воспламенения не превышает 15-20% от внутренней энергии смеси (рис. 3, рис. 4). При этом анализ профилей температур для случая воспламенения обедненной метано-воздушной смеси ($\Phi = 0,65$) позволяет утверждать следующее.

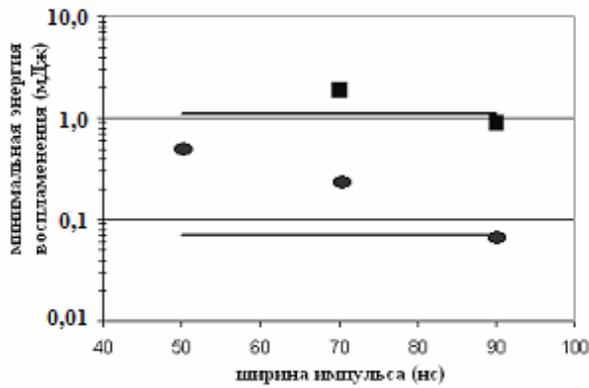


Рис. 2. Зависимость минимальной энергии воспламенения от длительности наносекундного импульса:
 ■ – наносекундный импульсный разряд, метановоздушная смесь;
 ● – наносекундный импульсный разряд, этиленовоздушная смесь;
 — – экспериментальные данные для искрового воспламенения

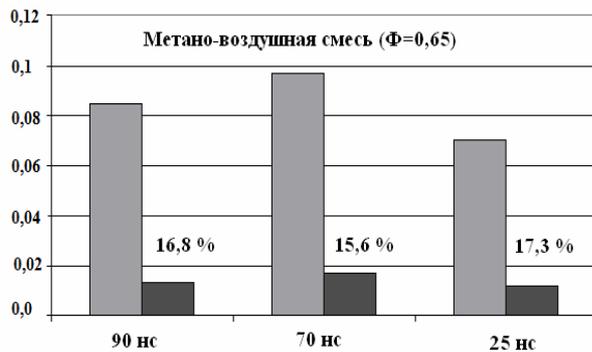


Рис. 3. Внутренняя энергия смеси и минимальная энергия воспламенения (мДж):
 ■ – внутренняя энергия;
 ■ – минимальная энергия воспламенения.

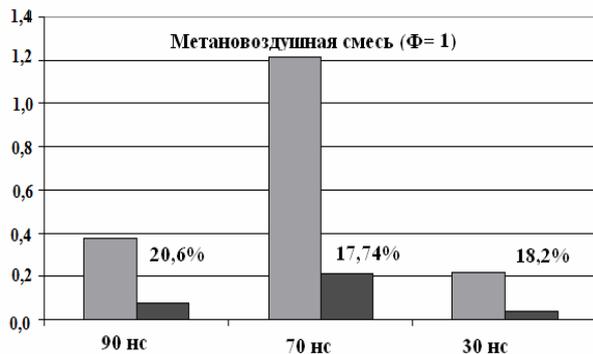


Рис. 4. Внутренняя энергия смеси и минимальная энергия воспламенения (мДж) при $\Phi = 1$

На ранней стадии развития очага пламени наблюдается резкий рост температуры в центре очага пламени для случая более короткого импульса, однако на более поздних временах происходит выравнивание температур, более того температура в центре очага пламени для более широкого импульса начинает превышать аналогичные значения для случая более короткого импульса. Таким образом, достичь заметного выигрыша в минимальной энергии воспламенения за счет ввода энергии наносекундным импульсом малой ширины при воспламенении обедненной смеси не представляется возможным.

Указанные закономерности для случая воспламенения наносекундным импульсным разрядом сохраняются при воспламенении смеси стехиометрического состава, однако при этом сами значения минимальной энергии воспламенения выше (рис. 4). Эффект снижения минимальной энергии воспламенения при уменьшении длительности импульса в данном случае выражен более ярко, степень такого снижения составляет величину порядка 50%.

Можно сделать вывод о том, что при воспламенении стехиометрической смеси более эффективным с точки зрения минимальной энергии воспламенения являются более короткие импульсы. Отметим, что и для случая искрового воспламенения экспериментальные данные по минимальной энергии воспламенения для метана показывают ее минимум в области обедненной смеси. Результаты вычислений также показали, что вклад колебательно-поступательной релаксации в процесс формирования начального очага пламени и распределение температур является незначительным и им можно пренебречь, равно как и вкладом нагрева смеси в процессе колебательно-поступательной релаксации в минимальную энергию воспламенения. Значения МЭВ являются более чувствительными к начальной температуре и составу формирующейся после разряда смеси, понижаясь при увеличении приведенного электрического поля разряда (рис.5).

Суммируя все вышесказанное, отметим, что существуют два способа снижения минимальной энергии воспламенения при воспламенении импульсным наносекундным разрядом. При воспламенении обедненной смеси более эффективным способом такого снижения является увеличение длительности импульса, основной механизм снижения МЭВ в этом случае – это тепловой нагрев смеси. При воспламенении стехиометрической смеси более эффективное снижение минимальной энергии воспламенения может быть достигнуто за счет уменьшения длительности импульса и увеличения приведенного электрического поля разряда, в данном случае уменьшение МЭВ достигается за счет дополнительной генерации продуктов диссоциации топлива. Сравнивая полученные результаты с данными по изменению времени задержки воспламенения [20] при воспламенении неравновесной плазмы наносекундного импульса, можно отметить, что для обед-

ненной смеси более эффективным способом такого снижения является увеличение длительности импульса, основной механизм снижения МЭВ в этом случае – это тепловой нагрев смеси. При воспламенении стехиометрической смеси более эффективное снижение минимальной энергии воспламенения может быть достигнуто за счет уменьшения длительности импульса и увеличения приведенного электрического поля разряда, в данном случае уменьшение МЭВ достигается за счет дополнительной генерации продуктов диссоциации топлива. Сравнивая полученные результаты с данными по изменению времени задержки воспламенения [20] при воспламенении неравновесной плазмы наносекундного импульса, можно отметить, что для обед-

ненной смеси воспламенение наносекундным импульсом является более эффективным для снижения времени задержки воспламенения, а для стехиометрической смеси – для обеспечения снижения минимальной энергии воспламенения.

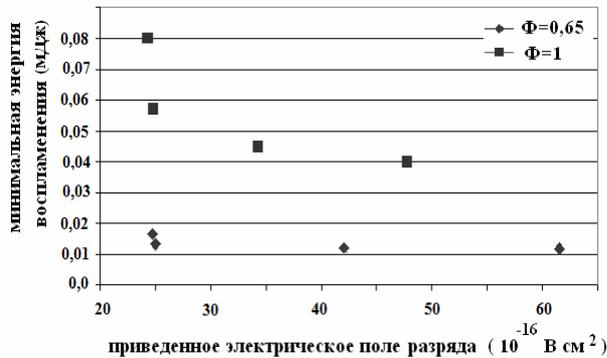


Рис. 5. Зависимость МЭВ от приведенного электрического поля импульса

Выводы

1. Предложена модель расчета минимальной энергии воспламенения при воспламенении наносекундным импульсным разрядом.
2. Приведены результаты численного моделирования процесса ламинарного горения топливно-воздушной смеси при ее воспламенении неравновесной плазмой.
3. Получены данные по зависимости минимальной энергии воспламенения от длительности импульса, приведенного электрического поля импульса и состава смеси.

Работа проведена в рамках USAF Window on Science Program.

Литература

1. Standard test method for minimum ignition energy and quenching distance in gaseous mixtures [Текст]. – ASTM Int. – 2007. – 16 p.
2. Lewis, B. Combustion, Flames and Explosion in gases [Текст] / B. Lewis, von Elbe. – Orlando: Academic Press., 1987. – 326 p.
3. Eckhoff, R.K. Explosion hazards in process industries [Текст] / R.K. Eckhoff. – Houston: Gulf Publishing Company, 2005. – 237 p.
4. Ko, Y. Spark ignition of propane-air mixture near the minimum ignition energy [Текст]: Part 1. An experimental study / Y. Ko, R.W. Anderson, V.S. Arpaci // Combustion and Flame. – 1991. – V.81. – P.75-87.
5. Moorhouse, J. An investigation of the minimum ignition energies of some C1 to C7 hydrocarbons [Текст] / J. Moorhouse, A. William, T.E. Maddison // Combustion and Flame. – 1974. – V.23. – P. 203-213.

6. Sloane, T.M. Energy requirements for spherical ignition in methane-air mixtures at different equivalence ratios [Текст] / T.M. Sloane // Combust. Sci. and Tech. – 1990. – V.73. – P. 351-365.

7. Frendi, A. Dependence of minimum ignition energy on ignition parameters [Текст] / A. Frendi, M. Sibulkin // Combust. Sci. and Tech. – 1990. – V.73. – P. 395-413.

8. On the calculation of the minimum ignition energy [Текст] / V. Kurdyumov, J. Blasco, L. Sanchez, A. Linan // Combustion and Flame. – 2004. – V. 81. – P.75-87.

9. Analysis of ignition mechanism of combustible mixtures by short duration sparks [Текст] / K. Ishii, M. Kono, K. Niu, T. Tsukamoto, Y. Ujiie // Proc. of Int. Symp. COMODIA. – 1990. – P. 153-158.

10. Kim, H.J. Numerical calculation of minimum ignition energy for hydrogen and methane fuels [Текст] / H.J. Kim, S.H. Chung, C.H. Sohn // KSME Int. Journal. – 2004. – V.18, N 5. – P.838-846.

11. A transition on minimum ignition energy for lean turbulent methane combustion in flamelet and distributed regimes [Текст] / C.C. Huang, S.S. Shy, C.C. Liu, Y.Y. Yan // Proc. of the Combustion Institute. – 2007. – V.31. – P. 1401-1409.

12. Phuoc, T.X. Laser-Induced spark ignition of CH₄/air mixtures [Текст] / T.X. Phuoc, F.P. White // Combustion and flame. – 1999. – V.119. – P. 203-216.

13. Nonequilibrium plasmas and its applications for combustion and hypersonic flow control [Текст] / N.B. Anikin., E.I. Mintoussov, S.V. Pancheshnyi, D.V. Roupasov, V.E. Sych, A.Yu. Starikovskii // Proc. of 41th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (Reno, Nevada, USA, 2003), AIAA-2003-1053.

14. Puchkarev, V. Energy efficient plasma processing of gaseous emission using a short pulse discharge [Текст] / V. Puchkarev, M. Gundersen // Appl. Phys. Lett. – 1997. – V.71(23). – P. 3364-3366.

15. Comparative analysis of engine ignition systems [Текст] / A.A. Tropina, L. Lenarduzzi, S.V. Marasov, A.P. Kuzmneko // IEEE Trans. on Plasma Science. – 2009. – V. 37. – P. 2286-2292.

16. Starikovskii, A.Yu. Plasma supported combustion [Текст] / A.Yu. Starikovskii // Proc. of Comb. Inst. – 2005. – V.30. – P. 2405-2417.

17. Tropina, A.A. Non-equilibrium plasma influence on the minimum ignition energy [Текст]. Part 1: Discharge model / A.A. Tropina, M. Uddi, Y. Ju // IEEE Trans. on Plasma Sci. – 2011. – V.39. – P.615-623.

18. Ignition of propane-air mixture by a sequence of nanosecond pulses [Текст] / S. Pancheshnyi, D.A. Lacoste, A. Bourdon, C.O. Laux // European Conf. for Aerospace Sciences (EUCASS), Moscow. – 2005. – № 5.12.05(3).

19. Тропина, А.А. Механизмы воспламенения импульсным наносекундным разрядом [Текст] / А.А. Тропина // Авиационно-космическая техника и технология, 2010. – № 5 (72). – С. 64-70.

20. Елецкий, А.В. Явления переноса в слабоионизированной плазме [Текст] / А.В. Елецкий,

Л.А. Палкина, Б.М. Смирнов. – М.: Атомиздат, 1975. – 325 с.

21. Capitelli, M. *Collision integrals of high temperature air species* [Текст] / М. Capitelli, С. Gorse,

S. Longo // *Journal of thermophysics and heat transfer*. – 2000. – V. 14., No.2. – P. 259-268.

22. *Handbook of chemistry and physics, 84th edition* [Текст]. – N.Y: CRC press, 2004. – 2616 p.

Поступила в редакцию 30.04.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. автомобильной электроники А.В. Бажинов, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков.

МІНІМАЛЬНА ЕНЕРГІЯ ЗАПАЛЮВАННЯ ПРИ ЗАПАЛЮВАННІ НАНОСЕКУНДНИМ ІМПУЛЬСНИМ РОЗРЯДОМ

А.А. Тропіна

Запропоновано модель процесу ламінарного горіння суміші та розрахунку мінімальної енергії запалювання у випадку запалювання нерівноважною плазмою наносекундного імпульсного розряду при атмосферному тиску. Модель ґрунтується на рівняннях переносу для багатоконпонентної реагуючої суміші сумісно з рівняннями для поступальної та коливальної температури. Одержано дані щодо залежності мінімальної енергії запалювання від тривалості імпульсу та складу суміші. Проведено оцінку внеску коливального збудження суміші в мінімальну енергію запалювання.

Ключові слова: імпульсний наносекундний розряд, мінімальна енергія запалювання, нерівноважна плазма, чисельне моделювання.

MINIMUM IGNITION ENERGY FOR THE NANOSECOND PULSED DISCHARGE IGNITION

A.A. Tropina

The model of mixture laminar combustion and the minimum ignition energy calculation for the case of non-equilibrium plasma ignition of the nanosecond pulsed discharge has been proposed. The model is based on the transport equations for the multicomponent reacting mixture combined with the equations for translational and vibrational temperatures. The data about the minimum ignition energy dependence on a pulse width and mixture composition were obtained. The evaluation of the input of the mixture vibrational excitation by a nanosecond impulse to minimum ignition energy was carried out.

Key words: repetitive nanosecond pulsed discharge, minimum ignition energy, nonequilibrium plasma, numerical modeling.

Тропіна Альбіна Альбертовна – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры теоретической механики и гидравлики национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: albina.tropina@fulbrightmail.org.