

УДК 537.523:538.4

**А.А. ТРОПИНА**

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина*

## **АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМОЙ**

Проведен сравнительный анализ возможных механизмов влияния низкотемпературной неравновесной плазмы наносекундного разряда на процессы воспламенения и горения в условиях высоких давлений. В качестве дополнительного параметра, характеризующего электродинамику процесса воспламенения импульсными источниками зажигания, предлагается использовать величину приведенного электрического поля разряда. Предлагается полуэмпирическое соотношение, позволяющее оценить изменение величины периода задержки воспламенения топливно-воздушной смеси в зависимости от приведенного электрического поля.

**неравновесная плазма, приведенное электрическое поле, наносекундный разряд, период задержки воспламенения**

### **Введение**

Проблема организации эффективного режима горения в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) является достаточно актуальной задачей в связи с экологическими проблемами защиты окружающей среды от вредных выбросов токсических веществ, образующихся при эксплуатации автомобильных ДВС. Решение этой проблемы напрямую связано с организацией устойчивого процесса горения обедненной смеси, в частности с реализацией бедного предела воспламенения на стадии формирования начального очага пламени. Известно, что нормальная скорость горения падает при уменьшении коэффициента избытка горючего, и для ее увеличения в этих условиях необходима соответствующая организация процесса воспламенения. Одним из способов реализации высокоэффективного процесса воспламенения является воздействие наносекундным импульсным разрядом. Использование таких разрядов позволяет организовывать высокие приведенные электрические поля и генерировать высокоэнергетические электроны, обеспечивающих производство электронно-возбужденных частиц, необходимых для развития процесса горения, практически без нагрева газа.

Возможность управления таким параметром, как средняя энергия электронов с помощью формирующейся неравновесной плазмы разряда, позволяет использовать плазменные системы воспламенения, не только для инициации, усиления и поддержания стабильного процесса горения обедненных смесей в ДВС, но и для реализации процесса воспламенения в условиях сверхзвуковых течений, характерных для различных аэрокосмических приложений.

**Анализ последних публикаций.** Проблема влияния разрядов на процесс горения исследуется достаточно давно. На сегодняшний день существует огромное количество экспериментальных работ, посвященных исследованию свойств различных видов неравновесных газовых разрядов. Подробный анализ последних экспериментальных работ с точки зрения возможного влияния формирующейся неравновесной плазмы на процессы горения и воспламенения приведен в обзоре [1]. Можно отметить, что основные свойства неравновесных разрядов при давлениях в несколько атмосфер, характерных для двигателей, являются недостаточно изученными, в связи с тем, что размеры формирующихся плазменных структур (стримеров) становятся очень малыми при таких давлениях, что делает их эксперимен-

тальное исследование затруднительным.

В тоже время, известно, что для разрядов малой продолжительности минимальная энергия, необходимая для воспламенения топливовоздушной смеси, прямо пропорциональна давлению и объему, занятому генерируемой разрядом плазмой, что, с учетом экспериментальных оценок диаметра цилиндрического плазменного столба, дает следующую оценку минимальной энергии воспламенения  $E_{\min} \cong L / p$ . Таким образом, использование наносекундных разрядов в качестве источника воспламенения оказывается наиболее эффективным при высоких давлениях.

Обзор работ, посвященных использованию импульсных разрядов в качестве источника воспламенения в ДВС, приведенный в работе [2], не позволяет сделать окончательного вывода о перспективах использования подобных систем, поскольку авторы отмечают как полное отсутствие положительного эффекта [3], так и огромные преимущества импульсных разрядов по сравнению с искровыми [4].

Несомненным является тот экспериментальный факт, что использование наносекундных разрядов позволяет обеспечивать работу двигателей на обедненных смесях, обеспечивая при этом увеличенную скорость распространения фронта пламени [5].

Можно отметить, что в технической литературе подобные системы воспламенения достаточно часто называют многоискровыми, что, по мнению автора, является принципиально неверным, поскольку искровой разряд представляет собой типичный пример равновесной плазмы с достаточно высокими токами (не менее 1 А), основной механизм воздействия которой на топливовоздушную смесь связан с локальным нагревом газа. В тоже время в разрядах наносекундного диапазона (токи порядка 100–250 мА) генерируется неравновесная плазма и основным механизмом инициирования горения является производство электронно-возбужденных атомов и молекул, ответственных за разветвление цепных реакций горения.

**Цель и постановка задачи.** В настоящей работе проводится теоретический анализ возможных механизмов влияния импульсных разрядов наносекундного диапазона на процессы воспламенения и горения в условиях высоких давлений.

### **Механизмы влияния импульсных разрядов на процессы воспламенения и горения**

При рассмотрении горения топливовоздушных смесей газовый разряд обычно рассматривают, как источник вводимой в систему тепловой энергии. Однако для различных типов разрядов при одинаковой мощности степень ионизации газа и протекание процесса воспламенения существенно различаются в зависимости от способа организации разряда. Вкладываемая разрядом электрическая энергия в зависимости от формы формируемого сигнала различным образом распределяется по внутренним степеням свободы молекул газа, вызывая соответствующие изменения в кинетической схеме процесса воспламенения.

При этом уменьшение длительности импульса (до десятков наносекунд) улучшает устойчивость плазмы и предотвращает переход разряда в дуговую форму, характерную для искрового разряда, так как характерное время импульса намного меньше, чем характерное время возникновения ионизационной неустойчивости и перехода разряда в дугу (порядка  $10^{-4} - 10^{-3}$  с).

Эффективность использования того или иного разряда в качестве источника воспламенения будем оценивать величиной приведенного электрического поля  $E / N$ , где  $E$  – напряженность электрического поля,  $N$  – концентрация молекул газа. Константы скоростей реакций ионизации, электронного и колебательного возбуждения, диссоциации молекул электронным ударом имеют ярко выраженную экспоненциальную зависимость от приведенного электрического поля, и при больших значениях  $E / N$

именно эта величина определяет генерацию большого количества химически активных частиц (радикалов), ответственных за процесс воспламенения.

Проведем оценку приведенного электрического поля для двух форм импульса наносекундного разряда, представленных на рис. 1.

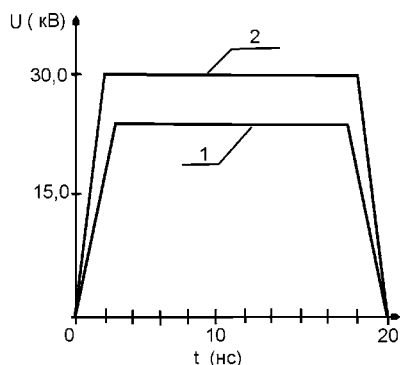


Рис. 1. Зависимость напряжения импульса от времени:

1 – по данным работы [1]; 2 – по данным работы [2]

При одинаковой конфигурации электродов, межэлектродном расстоянии  $d_0 = 10^{-2}$  м и начальной температуре смеси  $T_0 = 700^\circ$  К получаем следующий диапазон изменения приведенного электрического поля при изменении давления газа в пределах  $p \div 0,1 - 0,4$  МПа:

$$\text{Кривая 1 на рис. 1} - 150 Td \leq \frac{E}{N} \leq 38 Td ; \quad (1)$$

$$\text{Кривая 2 на рис. 1} - 280 Td \leq \frac{E}{N} \leq 70 Td . \quad (2)$$

При таких высоких приведенных полях возбуждаются в основном электронные уровни молекул, разряд приобретает стримерную форму и при обеспечении пространственной однородности разряда (путем использования многоэлектродных систем) будет реализовываться в режиме, так называемой быстрой ионизационной волны [6].

Для количественной оценки основных механизмов процесса воспламенения неравновесной плазмы наносекундного разряда в условиях высоких давлений и турбулентного течения газа необходимо рассматривать достаточно сложную кинетическую

схему процесса с учетом реакций с участием колебательно- и электронно-возбужденных молекул (константы скоростей которых в условиях высоких давлений еще не достаточно изучены) в сочетании с гидродинамикой турбулентного течения газа и физикой разряда.

Экспериментальные исследования влияния низкотемпературной неравновесной плазмы импульсных разрядов на процессы воспламенения и горения в условиях повышенных давлений и турбулентного течения смеси также являются очень затруднительным и число работ, посвященных этим исследованиям, является очень ограниченным, что не дает возможности проведения тестирования сложных математических моделей, основанных на уравнениях переноса. Фактически, на сегодняшний момент реальную количественную оценку можно провести только на инженерном уровне, ориентируясь на немногочисленные экспериментальные данные по измерению периода задержки воспламенения.

В тоже время, с физической точки зрения в качестве возможных механизмов влияния импульсных наносекундных разрядов на процесс воспламенения и горения можно отметить следующие:

- 1) снижение периода задержки воспламенения, стимулированное генерацией электронно- и колебательно-возбужденных частиц;
- 2) увеличение нормальной скорости распространения пламени, связанное с дополнительным производством активных частиц в зоне разряда и соответствующим увеличением скорости химической реакции горения;
- 3) возможный дополнительный перенос импульса, стимулирующий смешение и дополнительную генерацию мелкомасштабной турбулентности в зоне горения в присутствии разряда.

Приведенная в работе [7] оценка критерия Карловица, ответственного за режим горения, для случая горения метано-воздушной смеси в газовом двигателе дает величину

$$K = \frac{a_0 \sqrt{\varepsilon / 15 v_0}}{S_L^2} \leq 1, \quad (3)$$

где  $a_0$  – коэффициент температуропроводности свежей смеси;

$\varepsilon$  – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности;

$\nu_0$  – коэффициент кинематической вязкости свежей смеси;

$S_L$  – скорость нормального распространения пламени.

При таких условиях горение осуществляется в режиме крупномасштабной турбулентности (ламинарного искривленного фронта пламени) при пренебрежительно малом влиянии мелкомасштабной части спектра турбулентных пульсаций, а соответственно и пренебрежительно малом влиянии дополнительной мелкомасштабной турбулентности, генерируемой разрядом. Таким образом, в первом приближении, остаются два возможных механизма воздействия наносекундного разряда на процессы воспламенения и горения.

Данные экспериментальных исследований процессов воспламенения низкотемпературной плазмой различных неравновесных разрядов, приведенные в обзоре [1], позволяют утверждать, что реализация подобных систем воспламенения приводит к существенному снижению периода задержки воспламенения различных топливно-воздушных смесей.

В первом приближении, это влияние с учетом анализа констант скоростей инициируемых разрядом реакций и их зависимостей от приведенного электрического поля может быть учтено путем введения поправочной функции вида

$$\tau_{nd} = \tau_0 \exp\left(-a_0 \cdot \frac{E}{N}\right), \quad (4)$$

где  $\tau_0$  – период задержки воспламенения для случая искрового зажигания,

$\tau_{nd}$  – период задержки воспламенения при воспламенении неравновесной низкотемпературной

плазмой разряда;

$a_0$  – эмпирическая константа.

Значение эмпирической константы  $a_0 = 0,022$  выбиралось, исходя из экспериментальных данных о зависимости периода индукции для воспламенения пропано-воздушной смеси от приведенного электрического поля, приведенных в работе [8]. График зависимости (4) приведен на рис. 2.

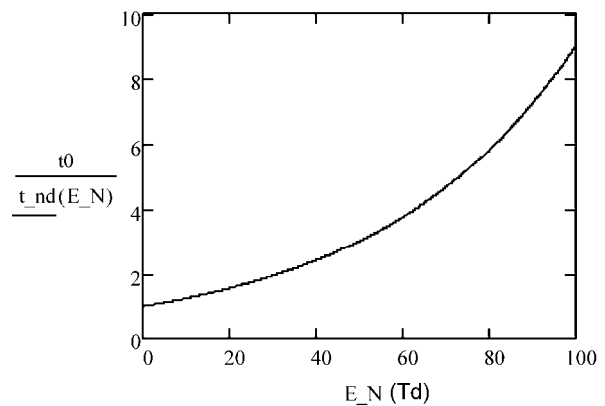


Рис. 2. Зависимость безразмерного периода задержки воспламенения от приведенного электрического поля

Сравнивая два вида наносекундных разрядов, представленных на рис. 1, с учетом зависимости (4) можно утверждать, что предполагаемое снижение периода задержки воспламенения (при  $p = 0,4$  МПа) лежит в пределах  $2,3 \div 4,7$  раза.

Оставшийся механизм воздействия разряда, связанный с изменением нормальной скорости распространения пламени в связи с увеличением скорости химической реакции горения, определяется скоростью производства радикалов за счет энергии разряда, которая также является функцией приведенного электрического поля.

Анализируя динамику процесса горения в двигателях, основываясь на полуэмпирическом уравнении выгорания топлива по теории И.И. Вибе, приходим к выводу, что показатель характера сгорания число  $m$  также должно быть нормировано на функцию, аналогичную соотношению (4).

Количественный анализ подобного влияния является предметом дальнейших экспериментальных исследований.

Таким образом, в число основных параметров, характеризующих процесс воспламенения и сгорания в двигателях при воспламенении наносекундным разрядом, предлагается ввести приведенное электрическое поле, как параметр, характеризующий электродинамические характеристики неравновесной плазмы.

### **Выводы**

1. Проведен сравнительный анализ возможных механизмов влияния неравновесной низкотемпературной плазмы наносекундного разряда на процессы воспламенения и горения.

2. Предложена полуэмпирическая оценка влияния электрических характеристик разряда на период задержки воспламенения топливно-воздушной смеси.

3. В качестве одной из основных характеристик нетепловых систем воспламенения предлагается использовать приведенное электрическое поле разряда.

Работа проведена в рамках гранта МОН Украины 0107U001007 “ Разработка теории управления процессами горения с помощью электрического поля ”.

### **Литература**

1. Starikovskaia S.M. Plasma assisted ignition and combustion // *J. Phys. D. Appl. Phys.* – 2006. – V.39. – R. 265-299.

2. Dale J.D., Chekel M.D., Smy P.R. Application of high energy systems to engines // *Prog. Energy Combustion Science.* – 1997. – №23. – P. 379-398.

3. Anderson R.W. The effect of ignition system power on fast burn engine combustion // *Trans. SAE (Paper 870549).* – 1997. – V.96. – P. 537-546.

4. Memarzadeh S., Colgrove J., Ronney P. Transient Plasma Discharge Ignition for Internal Combustion Engines // *Abstracts of the 3-d Int. Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion, Falls Church, USA.* – 2007. – P. 47-48.

5. Liu J., Ronney P.D., Gundersen M.A. Premixed flame ignition by transient plasma discharge // *Proc. 3-d Joint Meeting of the US Sections of the Combustion Institute, Chicago, USA.* – 2003. – Paper B-25.

6. Starikovskaia S.M., Anikin N.B., Pancheshnyi S.V., Zatsepin D.V. Pulsed breakdown at high overvoltage: development, propagation and energy branching // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2001. – V. 10. – P. 344-355.

7. Тропина А.А. Применение метода переключения моделей к исследованию процесса горения в двигателях // *Автомобильный транспорт: Сб. науч. тр.* – Х.: ХНАДУ. – 2005. – Вып. 17. – С. 40-44.

8. Кочетов И.В., Напартович А.П., Леонов С.В. Плазменное инициирование горения в сверхзвуковом потоке в топливно-воздушных смесях // *Химия высоких энергий.* – 2006. – № 2. – Т. 40. – С. 1-8.

*Поступила в редакцию 28.05.2008*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.В. Бажинов, Национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков.