

УДК 537.523:538.4

А.А. ТРОПИНА, А.П. КУЗЬМЕНКО, Д.В. ВИЛЬЧИНСКИЙ

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина

СИСТЕМА ЗАЖИГАНИЯ НА ОСНОВЕ НАНОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА

Предложена новая конструкция компактного генератора наносекундных импульсов на основе дрейфовых диодов с режимом восстановления. Приведены результаты эксперимента по использованию наносекундного импульсного разряда в качестве системы зажигания для двигателей внутреннего сгорания. Получено, что неравновесная плазма, формируемая разрядом, является эффективным средством для снижения удельного расхода топлива и концентрации оксидов азота. С помощью численного моделирования проведен анализ основных кинетических механизмов влияния разряда на формирование оксидов азота при высоких давлениях.

Ключевые слова: наносекундный импульсный разряд, система зажигания, дрейфовые диоды с режимом восстановления, численное моделирование.

Введение

Современные системы искрового зажигания можно разделить на две группы: индуктивного типа, содержащие катушку зажигания, которая запускается прерывателем или переключением транзистора; и системы конденсаторного типа с накоплением энергии в конденсаторе. Системы зажигания конденсаторного типа широко используются в гоночных автомобилях или в традиционных двухтактных двигателях. Энергия свечи и продолжительность разряда, генерируемого этими системами, зависят от конструкции конкретного двигателя. Однако средняя энергия разряда в искровом промежутке порядка 30 мДж, что в 10-100 раз больше, чем минимальная энергия воспламенения для горючих топливно-воздушных смесей при идеальных условиях. Длительность разряда для систем зажигания индуктивного типа, как правило, меняется в диапазоне 1-2 мс, для систем конденсаторного типа длительность генерируемой искры составляет величину порядка 0,1 мс.

1. Анализ последних публикаций

В последнее время интенсивно начали развиваться альтернативные системы зажигания, использующие вместо искрового разряда микроволновой [1,2], лазерный [3] или наносекундный импульсный разряд [4,5]. Каждая из этих систем имеет свои преимущества и недостатки. Одним из недостатков системы зажигания на основе лазерного разряда является высокая стоимость оборудования для генерации разряда, что существенно ограничивает ее широкое применение в двигателях внутреннего сгорания (ДВС). Известным недостатком систем зажигания на основе микроволнового разряда является необходимость создания зоны

предварительной ионизации с помощью искрового разряда с последующим добавлением энергии микроволновым разрядом, что также усложняет общую конструкцию системы зажигания. Кроме того, одним из побочных эффектов микроволнового зажигания является повышение уровня оксидов азота в выпускных газах двигателя.

Известно, что диапазон параметров, при которых возникает детонация при горении стехиометрической смеси, и параметров, при которых происходит гашение пламени обедненной смеси, может быть значительно расширен путем использования неравновесной плазмы наносекундного импульсного разряда [6]. Неравновесная плазма используется для воспламенения ультра-бедных смесей при высоких давлениях, позволяя тем самым расширить пределы воспламеняемости и устойчивого распространения пламени. При этом появляется возможность управления таким параметром, как средняя энергия электронов, что в свою очередь, позволяет использовать такие системы не только для инициации горения, но и для усиления и поддержания стабильного процесса горения обедненных смесей в ДВС.

Важность активных радикалов в процессах воспламенения и распространения реакций горения достаточно хорошо известна. Использование коротких наносекундных импульсов при этом имеет свои преимущества. Во-первых, это приводит к уменьшению требуемой для зажигания мощности искры, во-вторых, использование коротких импульсов приводит к снижению продолжительности фазы разряда, соответствующей режиму высоких токов, и, соответственно, предотвращает перегрев электродов.

Наносекундный импульсный разряд представляет собой одну из альтернатив равновесным разрядам искрового типа. Ультракороткая длительность импульса не позволяет данному разряду значительно нагреть топливно-воздушную смесь, но при действии разряда происходит образование высокоэнергетических электронов и короткоживущих электронно- и колебательно-возбужденных частиц, которые являются инициаторами процесса горения.

В работе [5] рассматривались основные характеристики системы зажигания на основе наносекундного импульсного разряда конденсаторного вида, когда энергия каждого импульса накапливалась в конденсаторе, и вкладывалась в фазе пробоя межэлектродного промежутка. Как уже отмечалось, подобная конструкция системы зажигания является наиболее оптимальной для гоночных автомобилей. Кроме того, сами блоки генератора импульсов являются достаточно громоздкими, что ограничивает их применимость.

В настоящей работе представлена новая компактная конструкция генератора наносекундных импульсов на основе дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ), используемая в качестве системы зажигания для обычных ДВС.

2. Цель и постановка задачи

Целью исследования является проведение сравнительного экспериментального анализа традиционной системы зажигания на основе искрового разряда и системы зажигания на основе наносекундного импульсного разряда, формируемого генератором на основе дрейфовых диодов с резким восстановлением.

Испытания системы зажигания были проведены на испытательном стенде кафедры двигателей внутреннего сгорания Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. В состав стенда входит двигатель МеМЗ -307, основные характеристики которого следующие: а) степень сжатия – 9,5; б) диаметр цилиндра и ход поршня, мм – 75,0×73,5; в) рабочий объем – 1,299 л. Двигатель МеМЗ -307 четырехцилиндровый, с системой распределенного впрыска топлива, рядный, верхнеклапанный, четырехтактный.

В рамках сотрудничества с Физико-техническим институтом имени А.Ф. Иоффе РАН была разработана компактная конструкция блоков генератора наносекундным импульсов на основе ДДРВ (рис. 1), которые для проведения эксперимента были объединены в общую конструкцию (рис. 2) с целью обеспечения возможности изменения амплитуды и частоты сигнала.

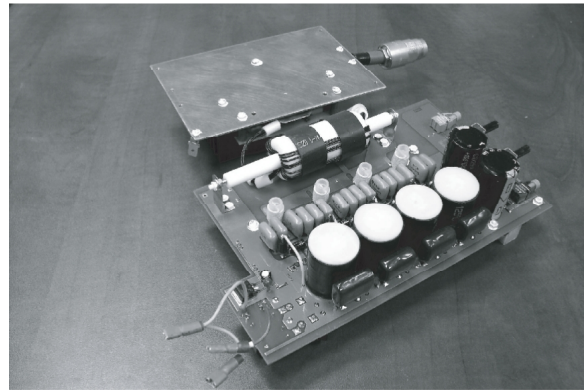


Рис. 1. Блоки генератора наносекундного импульсного разряда на основе ДДРВ



Рис. 2. Генератор наносекундных импульсных разрядов

Основные характеристики сигнала, формируемого генератором:

- 1) ширина импульса – 10 нс,
- 2) максимальное напряжение – 30 кВ,
- 3) максимальная частота – 10 кГц.

3. Результаты измерений

Схема испытаний включала в себя проведение измерений токсичности выхлопных газов двигателя и расхода топлива при различной нагрузке и числе оборотов двигателя.

Результаты измерений удельного расхода топлива представлены в таблице 1, где режимы 1-8 соответствуют стандартной системе зажигания, режимы 9-10 – системе зажигания на основе наносекундного импульсного разряда при частоте сигнала 1 кГц. Поскольку в данной серии экспериментов не удалось полностью перестроить программу по изменению угла опережения зажигания, который существенно меняется при замене системы зажигания, испытания системы зажигания на основе наносекундного импульсного разряда были проведены только для случая малых нагрузок.

Таблица 1
Результаты измерений удельного расхода топлива

Номер режима	Число оборотов двигателя	Нагрузка (%)	Удельный расход топлива г/ (кВт. ч)
1	3000	100 (P = 25,6 кг)	321.03
2		75	313.11
3		50	235.58
4		20	97.19
5	3500	100 (P = 25,6 кг)	1343.23
6		75	729.59
7		50	405.53
8		20	144.55
9	3500	20	127.62
10	3000	20	96.46

Можно отметить, что замена системы зажигания позволяет обеспечить более полное сгорание топлива, что, в свою очередь, приводит к снижению удельного расхода топлива, и соответственно, к повышению эффективности работы двигателя. С учетом того, что в данном эксперименте рассматривалось горение стехиометрической смеси, следует ожидать еще более высокого уровня снижения расхода топлива при обеднении смеси.

В то же время организация такого воспламенения позволяет обеспечить снижение содержания оксидов азота в выхлопных газах двигателя (рис. 2) по сравнению со случаем стандартного искрового зажигания.

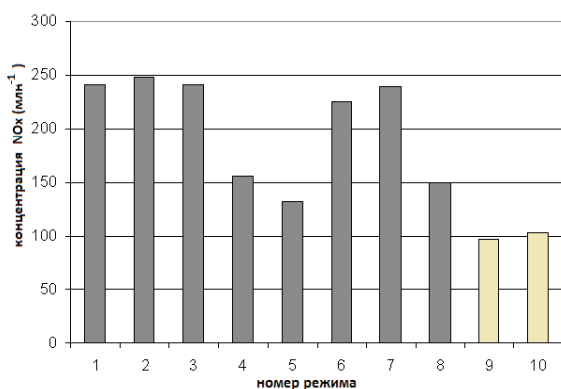


Рис. 3. Экспериментальные значения концентрации оксидов азота в выхлопных газах для различных режимов работы двигателя

4. Результаты расчетов

Для того, чтобы объяснить наблюдаемые тенденции снижения концентрации оксидов азота при воспламенении наносекундным импульсным разрядом в условиях высоких давлений дополнительно были проведены расчеты химического состава смеси с помощью разработанного на языке FORTRAN программного пакета S-PLASIG, который включает в себя следующие программные блоки: блок расчета констант скоростей реакций с участием электронов на основе решения уравнения Больцмана; блок расчета констант скоростей реакций с участием нейтральных частиц на основе соотношений Аррениуса, блок расчета термодинамических свойств смеси и программный модуль DLSODE для решения системы уравнений химической кинетики. Верификация программы и детали дискретизации приведены в работе [7].

При моделировании процесса воспламенения импульсным наносекундным разрядом использовалась кинетическая схема горения углеводородов GRI 3.0, содержащая 53 нейтральные компоненты и 322 реакции [8]. Дополнительно учитывалось наличие положительных и отрицательных ионов, электронов и электронно-возбужденных частиц вида

$O_2(a^1\Delta)$, $O_2(b^1\Sigma)$, $O_2(c^1\Sigma)$, $O(^1D)$, $O(^3P)$, $N_2(A^3\Sigma)$, $N(^4S)$, $N_2(B^3\Pi)$, $N_2(C^3\Pi_u)$, $N(^2D)$, $N(^2P)$, $N_2(a^1\Sigma)$, а также колебательно возбужденных молекул азота в основном электронном состоянии $N_2(x^1\Sigma, v)$. Используемая кинетическая схема, дополнительно к механизму горения углеводородов, включала 343 реакции с участием заряженных и возбужденных частиц [9].

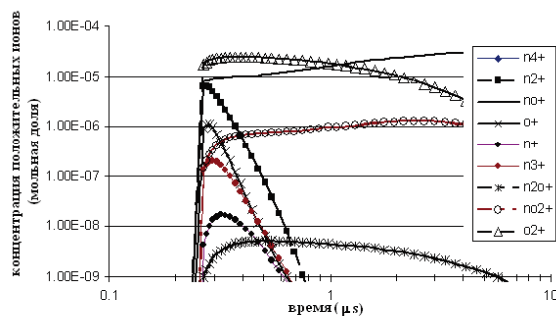


Рис. 2. Временные зависимости концентраций положительных ионов

Расчеты ионного состава, проведенные для случая действия наносекундного импульса длительностью 10 нс, с напряжением 25 кВ на предварительно нагретую до температуры 700 °К (при $p_0=10$ атм) топливно-воздушную смесь показали следующее. Основными по-

ложительными ионами, которые формируются наносекундным импульсным разрядом являются ионы NO^+ и ионы O_2^+ (рис. 2). Основным отрицательным ионом в таких условиях (рис. 3) является ион O^- .

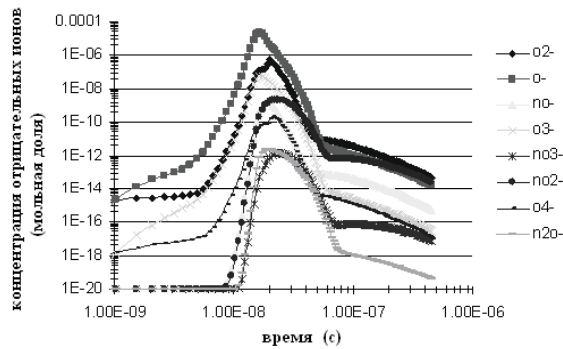


Рис. 3. Временные зависимости концентраций отрицательных ионов

В то же время было получено, что формирование ионов при действии разряда не является причиной наблюдаемого снижения оксидов азота. Еще одним результатом действия разряда является формирование различного рода радикалов, в частности, атомов кислорода, радикалов OH и CH . Результаты расчетов влияния каждого из этих компонентов на формирование оксидов азота приведены на рис. 4-5. Анализ полученных расчетных данных позволяет утверждать следующее.

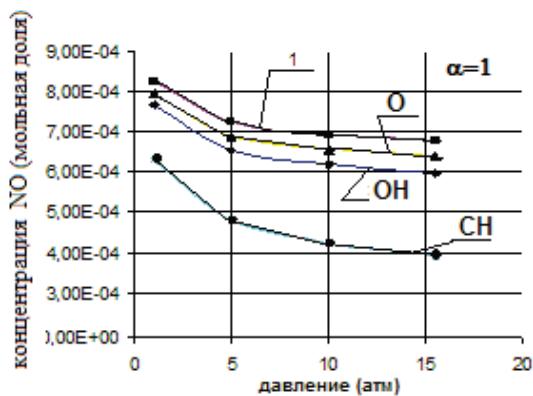


Рис. 4. Зависимости равновесной концентрации оксидов азота от давления в камере сгорания при воспламенении импульсным наносекундным разрядом (стехиометрическая смесь): 1- без разряда

Наблюдаемое в экспериментах снижение содержания оксидов азота в выхлопных газах двигателя при использовании системы зажигания на основе наносекундного импульсного разряда, связано с радикалом CH , который формируется в результате расщепления раз-

рядом молекулы топлива. Согласно кинетической схеме горения углеводородов GRI 3.0 [8] радикал CH активно реагирует с молекулами NO , тем самым, существенно снижая содержание оксидов азота.

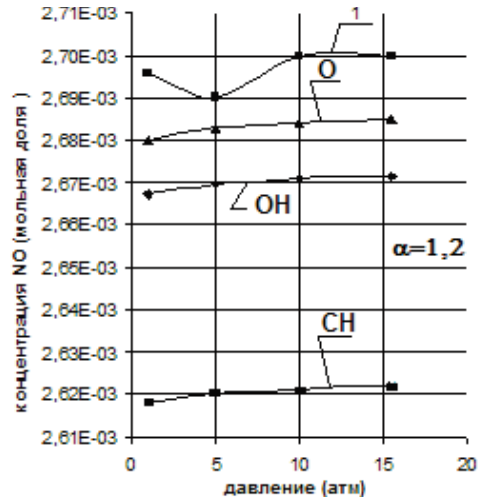


Рис. 5. Зависимости равновесной концентрации оксидов азота от давления в камере сгорания при воспламенении импульсным наносекундным разрядом (обедненная смесь): 1- без разряда

5. Выводы

Представлена модель компактного генератора наносекундного импульсного разряда на основе дрейфовых диодов с резким восстановлением.

Представлены результаты эксперимента по измерению удельного расхода топлива и содержания оксидов азота в ДВС с системой воспламенения на основе наносекундного импульсного разряда.

Показано, что основным радикалом, ответственным за снижение оксидов азота при воспламенении наносекундным импульсным разрядом, является радикал CH .

Литература

1. Esakov I.I. Efficiency of propane-air mixture combustion assisted by deeply undercritical MW discharge in cold high-speed airflow [Text]/ I.I. Esakov, L.P. Grachev, K.V. Khodataev, V.A. Vinogradov, D.M. Van Wie /44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (Reno, Nevada, USA, 2006), AIAA-2006-1212.
2. DeFilippo A. Extending the lean stability limits of gasoline using a microwave-assisted spark plug [Text]/ A. DeFilippo, S. Saxena, V. Rapp // SAE Paper 2011-01-0663. — 2011.
3. Phuoc T. X. Laser-induced spark ignition of CH_4 -air mixture [Text]/ T. X. Phuoc, F. P. White //

Combustion and Flame. — Vol.136. — 2006. — P. 199-205.

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

5. Tropina A.A. Comparative analysis of engine ignition systems [Text]/ A.A. Tropina A.A., L. Lenarduzzi, S.V. Marasov, A.P. Kuzmenko// IEEE Trans. on Plasma Science. — Vol. 37. — 2009. — P. 2286-2292.

6. Messina D. Study of a non-equilibrium nanosecond discharge at atmospheric pressure using coherent anti-Stokes Raman scattering [Text]/ D. Messina, B. Attal-Tretout, F. Grisch// Proc. of the Comb. Inst. — Vol. 31. — 2007. — P. 825-832.

7. Тропіна А.А. Механізми воспламенения импульсным наносекундным разрядом[текст] / А.А. Тропина// Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». — Х., 2010. — Вып. 5(72). — С. 64-70.

8. Kinetic scheme of high temperature methane oxidation [электронный ресурс]/G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach. Режим доступа http://www.me.berkeley.edu/gri_mec.

9. Tropina A.A. Non-equilibrium plasma influence on the minimum ignition energy. Part I: Discharge model [Text]/ A.A. Tropina, M. Uddi, Y. Ju. // IEEE Trans. on Plasma Sci.— Vol. 39, No. 1. — 2011. — P. 615-623.

Поступила в редакцию 20.06.2014

А.А. Тропіна, А.П. Кузьменко, Д.В. Вільчинський. Система запалювання на базі наносекундного імпульсного розряду

Запропоновано нову конструкцію компактного генератора наносекундних імпульсів на основі дрейфових діодів із різким відновленням. Наведені результати експерименту з використання наносекундного імпульсного розряду в якості системи запалювання для двигунів внутрішнього згоряння. Одержано, що нерівноважна плазма, що формується розрядом, є ефективним засобом для зниження питомого розходу палива і концентрації оксидів азоту. За допомогою чисельного моделювання проведено аналіз головних кінетичних механізмів впливу розряду на формування оксидів азоту при високому тиску.

Ключові слова : наносекундний імпульсний розряд, система запалювання, дрейфові діоди із різким відновленням, чисельне моделювання.

A.A. Tropina, A.P. Kuzmenko, D.V. Vilchinsky. Ignition system on the basis of the nanosecond pulsed discharge

A new model of the compact generator of nanosecond pulses on the basis of drift step recovery diodes has been proposed. Experimental results of nanosecond pulsed discharge using as an ignition system for internal combustion engines has been presented. It was obtained that nonequilibrium plasma formed by the discharge is an effective way for the specific fuel consumption decrease as well as the nitride oxide concentration decrease. Analysis of main kinetic mechanisms of the discharge influence of the nitride oxide formation at high pressures has been carried out by the numerical modeling.

Key words: nanosecond pulsed discharge, ignition system, drift step recovery diodes, numerical modeling.