

СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

А.А. Тропина, доцент, к. ф.-м. н., А.П. Кузьменко, аспирант,
ХНАДУ, В.И. Стаценко, ст. преп., ДНУ,
Г.В. Майстренко, аспирант, ХНАДУ

***Аннотация.** Приведены данные экспериментальных замеров токсичности отработавших газов и расхода топлива для двигателя MeMЗ-307 при использовании базовой системы зажигания и системы зажигания наносекундным разрядом. Результаты экспериментов показали, что использование нетепловой системы зажигания приводит к существенному увеличению полноты сгорания топлива и снижению токсичности, как при работе двигателя на жидком топливе, так и при использовании природного газа. Проведена аналитическая оценка состава продуктов сгорания и физических механизмов воздействия импульсных разрядов на процесс воспламенения.*

***Ключевые слова:** система зажигания, наносекундный разряд, токсичность отработавших газов, процесс воспламенения, двигатель внутреннего сгорания.*

Введение

Организация высокоэффективного процесса воспламенения в двигателях внутреннего сгорания является очень сложной задачей. Это связано не только с работой при высоких давлениях, но и с широким диапазоном нагрузок, реализующихся при работе двигателя, и, соответственно, с различными требованиями к системам зажигания. Актуальность проблемы напрямую связана с экологическими проблемами защиты окружающей среды от вредных выбросов токсичных веществ, образующихся при эксплуатации двигателей внутреннего сгорания.

Одним из способов реализации высокоэффективного процесса воспламенения является использование наносекундного импульсного разряда. Использование таких разрядов позволяет организовывать высокие приведенные электрические поля и генерировать высокоэнергетические электроны, обеспечивающие производство электронно-возбужденных частиц, необходимых для эффективной инициации процесса горения.

Анализ публикаций

Проблема влияния разрядов на процесс горения и их использование в качестве инициатора процесса воспламенения исследуется достаточно давно. Наиболее распространенным способом воспламенения топливовоздушной смеси в двигателях с принудительным зажиганием является организация зажигания посредством электрической искры (искрового разряда). При этом реализуется тепловой механизм воспламенения путем создания высокотемпературного токопроводящего канала между электродами свечи. Одним из альтернативных способов воспламенения является воздействие короткоимпульсным наносекундным разрядом, приводящим к формированию неравновесной плазмы и генерации высокоэнергетических электронов, стимулирующих процесс воспламенения.

Обзор работ, посвященных использованию короткоимпульсных разрядов в качестве источника воспламенения в ДВС [1– 4], не позволяет сделать окончательного вывода о перспективах использования подобных систем, поскольку отмечается как полное отсут-

ствии положительного эффекта [2], так и огромные преимущества импульсных разрядов по сравнению с искровыми [3 – 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.

Предварительные результаты дорожных испытаний системы зажигания, основанной на использовании разряда наносекундного диапазона, приведенные в работе [5], позволяют сделать вывод о перспективности использования неравновесной плазмы, формируемой разрядом, в качестве инициатора процесса воспламенения в двигателях.

Цель и постановка задачи

Целью настоящего исследования является проведение сравнительного анализа базовой (искровой) системы зажигания и нетепловой системы зажигания на основе наносекундного разряда. Эффективность использования той или иной системы зажигания оценивается по составу отработавших газов двигателя и расходу топлива в ходе проведения испытаний на экспериментальном стенде кафедры двигателей внутреннего сгорания ХНАДУ, в состав которого входит двигатель МеМЗ-307, работающий как на жидком топливе (бензин марки А-95), так и на природном газе. Дополнительно оценивается эффективность использования нетепловой системы зажигания с различными свечами зажигания. Обсуждение полученных экспериментальных данных проводится на основе аналитического анализа механизмов воздействия короткоимпульсных разрядов на процесс воспламенения газозооушной смеси и на основе равновесного расчета продуктов сгорания.

Результаты эксперимента

Сравнительные испытания систем зажигания были проведены на испытательном стенде кафедры двигателей внутреннего сгорания ХНАДУ. Схема стенда приведена на рис. 1.

Основными компонентами стенда являются: 1 – балансирующая машина; 2 – набор сопротивлений; 3 – карданная передача; 4 – коробка передач ВА3-2103; 5 – запас газового топлива;

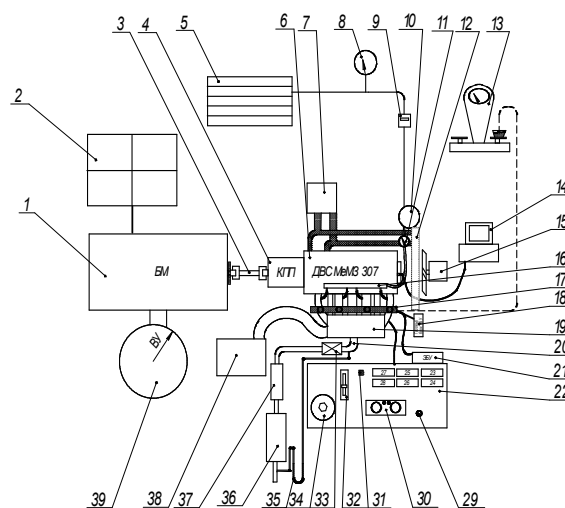


Рис. 1. Схема испытательного стенда

6 – двигатель МеМЗ-307; 7 – водяной теплообменник; 8 – манометр; 9 – расходомер газа; 10 – двухступенчатый газовый редуктор; 11 – манометр; 12 – радиатор двигателя; 13 – механические весы для измерения расхода жидкого топлива; 14 – измерительно-вычислительный комплекс; 15 – вентилятор; 16 – газовая рампа с форсунками; 17 – бензиновая рампа с форсунками; 18 – электронный блок управления газовой системой; 19 – впускной коллектор; 20 – выпускной коллектор; 21 – электронный блок управления двигателем; 22 – пульт управления; 23 – прибор для измерения температуры охлаждающей жидкости (ОЖ) двигателя; 24 – прибор для измерения температуры масла двигателя; 25 – прибор для измерения температуры отработавших газов двигателя; 26 – прибор для измерения давления масла в системе смазки двигателя; 27 – прибор для измерения частоты вращения коленчатого вала двигателя; 28 – прибор для измерения частоты вращения ротора балансирующей машины; 29 – замок зажигания; 30 – приборная панель автомобиля; 31 – кнопка для переключения вида топлива; 32 – рукоятка для управления дроссельной заслонкой; 33 – устройство для изменения сопротивления выпускной системы; 34 – устройство для управления нагрузкой на ДВС; 35 – прибор для измерения сопротивления выпускной системы; 36 – глушитель шума; 37 – резонатор; 38 – расходомер воздуха; 39 – весовое устройство для измерения нагрузки.

В состав стенда входит двигатель МеМЗ-307, имеющий следующие основные характеристики:

- 1) степень сжатия – 9,5;
- 2) диаметр цилиндра и ход поршня, мм – 75,0 × 73,5;
- 3) рабочий объем – 1,299 л.

Двигатель MeM3-307 – четырехцилиндровый, с системой распределенного впрыска топлива, рядный, верхнеклапанный, четырехтактный.

Схема испытаний включала в себя проведение следующих измерений:

- 1) токсичности отработавших газов двигателя;
- 2) расхода топлива;
- 3) индикаторной диаграммы двигателя.

Основные характеристики системы зажигания:

- 1) входное напряжение – 12 В;
- 2) выходная мощность – 150 мДж;
- 3) скорость нарастания высоковольтного импульса – 15 кВ/нс;
- 4) продолжительность импульса – 22 нс.

Измерения были проведены для искровой системы зажигания (базовой комплектации) и нетепловой системы зажигания при работе двигателя, как на жидком топливе, так и на природном газе. Дополнительно оценивалась эффективность работы нетепловой системы зажигания с различными свечами зажигания фирмы Plazmofog. Окончательно испытания были проведены для следующих 5 комплектаций системы зажигания:

- 1) базовая система зажигания, одноэлектродные свечи;
- 2) нетепловая система зажигания, одноэлектродные свечи;
- 3) нетепловая система зажигания, трехэлектродные свечи;
- 4) нетепловая система зажигания, форкамерные свечи;
- 5) нетепловая система зажигания, форкамерные свечи газ-бензин.

Погрешность измерений – в пределах 2 – 3%. Нагрузочная характеристика двигателя приведена в табл. 1.

Результаты измерений расхода топлива для режимов 2,7, соответствующих 100% нагрузке (при $n=3500$ об/мин, крутящий момент $P=96$ Н·м, при $n=3500$ об/мин $P=101,5$ Н·м), приведены в табл. 2.

Таблица 1 Нагрузочная характеристика двигателя

Номер режима	Число оборотов двигателя (об/мин)	Нагрузка (%)	Продолжительность (мин)
1	Холостой ход	–	4
2	3000	100	2
3		75	2
4		50	2
5		25	2
6		15	2
7	3500	100	2
8		75	2
9		50	2
10		25	2
11		15	2

Анализ полученных результатов показал, что при использовании системы зажигания наносекундным разрядом расход топлива при работе двигателя на жидком топливе уменьшается на 6 – 11% (в зависимости от выбранных свечей зажигания) по сравнению с базовой искровой системой зажигания.

Тот факт, что расход топлива практически не изменился при работе двигателя на газе, напрямую связан с тем, что сечения ионизации электронным ударом для метана (в отличие от пропана) ниже, чем для жидкого топлива. Кроме того, процентное содержание метана в стехиометрической газозооной смеси является достаточно низким, соответственно, основные преимущества плазменной системы при работе двигателя на газе будут наиболее полно реализовываться при горении обедненной смеси.

Таблица 2 Результаты измерений расхода топлива

№ комплектации	Число оборотов двигателя (об/мин)	Расход жидкого топлива (кг/час)	Расход газа (м ³ /час)
1	3500	1,2	0,0837
	3000	0,947	0,0735
2	3500	1,105	0,084
	3000	1,0	0,0735
3	3500	1,058	0,0847
	3000	0,947	0,074
4	3500	1,105	0,0837
	3000	0,947	0,072
5	3500	1,058	0,085
	3000	0,973	0,075

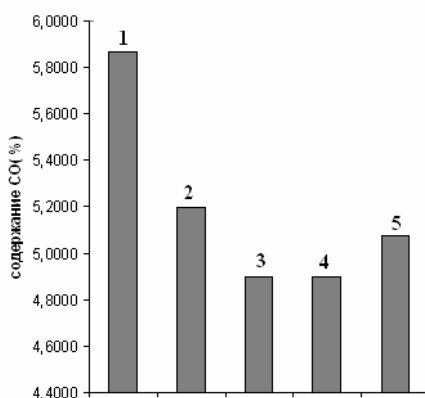


Рис. 2. Содержание СО в отработавших газах двигателя ($n=3500$ об/мин, бензин А-95)

На данный момент комплектация испытательного стенда не позволяет варьировать ни угол опережения зажигания, ни состав топливно-воздушной смеси, соответственно, установленные базовые параметры системы зажигания не являются оптимальными, особенно при работе двигателя на природном газе. Однако, несмотря на это, результаты измерений токсичности отработавших газов двигателя показали достаточно обнадеживающие результаты.

Так, на рис. 2, 3 приведены данные измерений содержания окиси углерода в отработавших газах двигателя при 100% нагрузке и при варьировании системы и свечей зажигания. Цифры на всех рисунках соответствуют выше приведенной нумерации комплектаций системы зажигания.

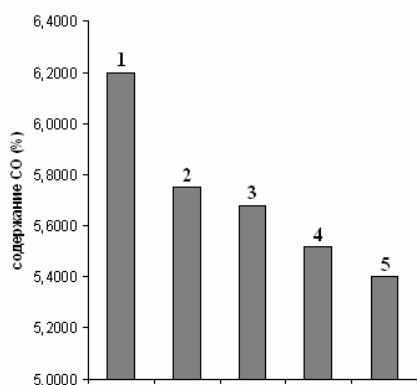


Рис. 3. Содержание СО в отработавших газах двигателя ($n=3000$ об/мин, бензин А-95)

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что при работе двигателя на жидком топливе использование нетепловой системы зажигания в сочетании с базо-

вым комплектом одноэлектродных свечей, при прочих равных условиях, обеспечивает снижение концентрации СО на 7 – 11 %. При этом использование плазменной системы зажигания оказывается наиболее эффективным в сочетании с форкамерными свечами, обеспечивая при этом снижение содержания окиси углерода в пределах 12 – 17 %.

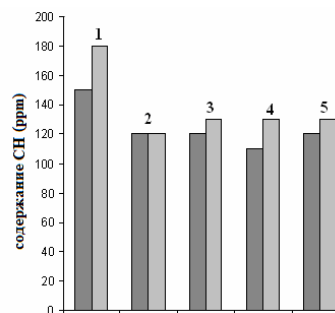


Рис. 4. Содержание СН в отработавших газах двигателя (бензин А-95):

■ – $n=3500$ об/мин, □ – $n=3000$ об/мин

Полнота сгорания топлива оценивалась по содержанию СН в отработавших газах двигателя. Результаты проведенных измерений концентрации углеводородов при работе двигателя на жидком топливе (рис. 4) и на природном газе (рис. 5) показали, что плазменная система зажигания показывает лучшие экологические показатели, чем базовая система зажигания искровым разрядом.

Так, использование нетепловой системы зажигания обеспечивает снижение содержания СН в отработавших газах двигателя при его работе на бензине на 20 – 30%. При работе двигателя на газе замена системы зажигания приводит к снижению концентрации СН на 28-33 %, а в сочетании с использованием форкамерных свечей – на 57%.

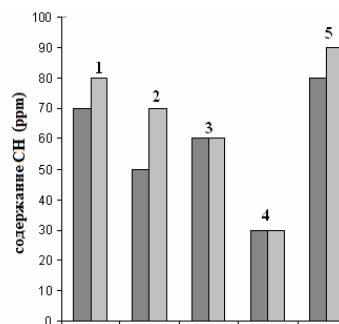


Рис. 5. Содержание СН в отработавших газах двигателя (топливо – природный газ):

■ – $n=3500$ об/мин, □ – $n=3000$ об/мин

Механизмы влияния короткоимпульсных разрядов на процессы воспламенения и горения

Как показали результаты лабораторных экспериментов, одним из основных преимуществ системы зажигания на основе наносекундного разряда является снижение расхода топлива и повышение экологических показателей процесса сгорания по сравнению со стандартной искровой системой зажигания.

Обычно искровой разряд рассматривается как источник тепловой энергии. В то же время для других видов разрядов уровень ионизации газа и организация процесса воспламенения существенно зависят от способа ввода энергии системой зажигания. В зависимости от формы сигнала, формируемого генератором импульсов, энергия электромагнитного поля по-разному распределяется по внутренним степеням свободы молекул.

При этом превышение уровня напряжения пробоя может быть достигнуто, если импульс высокого напряжения создается и прерывается за достаточно короткий промежуток времени (десятки наносекунд). Кроме того, использование разрядов наносекундного диапазона улучшает устойчивость плазмы и позволяет избегать характерного для искрового разряда перехода из тлеющей в дуговую форму, поскольку характерное время такого перехода составляет порядка 10^{-3} – 10^{-4} с.

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.

Что касается дополнительного переноса импульса под воздействием разряда, то его влияние можно оценить, опираясь на значение числа Карловица, ответственного за режим горения, оценка которого для случая горения метано-воздушной смеси в газовом двигателе по результатам работы [6] дает величину

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

где a_0 – коэффициент температуропроводности свежей смеси; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; v_0 – коэффициент кинематической вязкости свежей смеси; S_L – скорость нормального распространения пламени.

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

Учитывая то, что продолжительность импульса наносекундного разряда является достаточно короткой, приближенную оценку эффективности использования того или иного разряда в качестве источника воспламенения можно провести используя величину приведенного электрического поля разряда 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.

В работе [7] на основе проведенных расчетов динамики распространения стримера в меж-

электродном промежутке при высоких давлениях без учета процесса ветвления стримера получен следующий расчетный диапазон изменения приведенного электрического поля (в канале стримера): для межэлектродного расстояния $d_0 = 10^{-3}$ м и начальной температуры смеси $T_0 = 700$ °К при изменении давления газа в пределах $p \div 0,1 - 5$ МПа

$$280 Td \leq \frac{E}{N} \leq 70 Td. \quad (2)$$

Такие приведенные электрические поля обеспечивают возбуждение электронных уровней молекул и производство химически активных частиц, что энергетически является более выгодным для организации процесса воспламенения по сравнению с тепловым механизмом, реализующимся при искровом разряде.

Для аналитической оценки механизмов влияния наносекундных разрядов на процесс воспламенения и горения дополнительно были проведены теоретические расчеты равновесного состава продуктов сгорания стехиометрической топливно-воздушной смеси на основе Ставропольского природного газа, состоящего из следующих компонентов: $\text{CH}_4 - 97,7\%$, $\text{C}_3\text{H}_8 - 0,3\%$, $\text{C}_2\text{H}_4 - 0,2\%$, $\text{CO}_2 - 0,5\%$, $\text{N}_2 - 1,3\%$.

Равновесный расчет проводился для 53 компонентов и 325 реакций на основе детальной кинетической схемы высокотемпературного окисления метана GRI-MECH 3.0 [8]. Действие разряда моделировалось инъекцией радикалов O и OH. Результаты расчетов равновесной концентрации окиси углерода приведены на рис. 6; там же приведены результаты экспериментальных замеров.

Можно отметить, что наличие в исходной смеси дополнительной концентрации радикалов, моделирующих действие наносекундного разряда, приводит к снижению равновесной концентрации окиси углерода. В то же время наблюдаемые в эксперименте отклонения содержания окиси углерода от равновесных значений могут быть связаны с наличием в исходной смеси в камере сгорания двигателя продуктов неполного сгорания. Этот вывод подтверждается результатами равновесного расчета продуктов сгорания при дополнительной инъекции углеводородов в исходную смесь.

Согласно равновесным расчетам содержание углеводородов в продуктах сгорания пренебрежимо мало. Основной причиной отклонения экспериментальных значений концентрации углеводородов от равновесных значений является неоднородность температуры и состава смеси в камере сгорания.

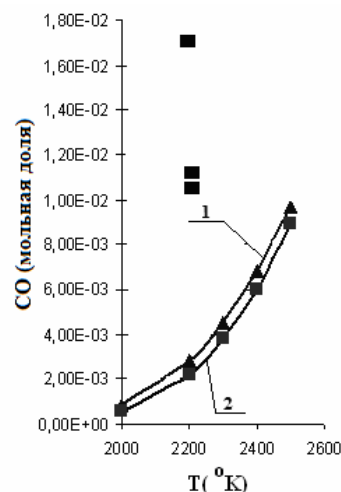


Рис. 6. Равновесные и экспериментальные концентрации CO: 1 – без разряда, 2 – при действии разряда, ■ – экспериментальные данные

Согласно данным, приведенным в работе [9], основной зоной, где образуется углеводороды, являются так называемые зоны гашения пламени, расположенные вблизи холодных стенок камеры сгорания. Толщина зоны гашения обратно пропорциональна нормальной скорости и может быть оценена как $\delta \cong S_L^{-1/2}$.

Таким образом, снижение концентрации углеводородов в продуктах сгорания при плазменном зажигании может быть связано с уменьшением толщины зоны гашения пламени, а основной причиной такого снижения является увеличение нормальной скорости распространения пламени под действием разряда. Опираясь на измеренные значения концентрации углеводородов, можно предположить, что действие разряда приводит к увеличению нормальной скорости пламени в 1,2 – 2,25 раза.

Выводы

1. Проведенное экспериментальное исследование подтверждает эффективность использования наносекундного разряда в качестве

инициатора процесса воспламенения в двигателях, обеспечивающего снижение расхода топлива при одновременном снижении токсичности отработавших газов двигателя.

2. Аналитическая оценка механизмов действия разряда позволяет утверждать, что основной причиной такого снижения при плазменном зажигании является увеличение нормальной скорости распространения пламени.

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

Литература

1. 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.
2. Anderson R.W. The effect of ignition system power on fast burn engine combustion //Trans. SAE (Paper 870549). –1997. – V.96. – P. 537 – 546.
3. 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.
4. 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.
5. Lenarduzzi L., Tropina A., Panikarsky A., Bozhenov V. Test Results of the Non-thermal Plasma Ignition System for Internal Combustion Engines// Abstracts of the 4-th Int. Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPAC), 16-19 Sept. 2008, Falls Church, VA, USA. – P. 14 – 16.
6. Тропина А.А. Применение метода переключения моделей к исследованию процесса горения в двигателях: Сб. науч. тр. // Автомобильный транспорт. – Харьков: ХНАДУ. – 2005. – Вып. 17. – С. 40 – 44.
7. Tropina A. Numerical analysis of a nanosecond discharge dynamics// Abstracts of the 4-rd Int. Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPAC), 16-19 Sept. 2008, Falls Church, VA, USA. – P. 53 – 55.
8. Smith G.P., Golden D.M., Frenklach M., et al. http://www.me.berkeley.edu/gri_mec.
9. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.

Рецензент: А.В. Бажинов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2009 г.