

## РАЗВИТИЕ НАЧАЛЬНОГО ОЧАГА ГОРЕНИЯ ГОМОГЕННОЙ ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЦИЛИНДРЕ ДВС

Г.Н. Злотин, д.т.н., К.В. Приходьков, к.т.н., С.Н. Шумский, к.т.н.;  
Волгоградский государственный технический университет

В работе рассматривается модель процесса формирования начального очага горения при искровом воспламенении топливовоздушной смеси. Формирование начального очага разделено по времени на три последовательных стадии в зависимости от получаемой им энергии. Учитываются отдельно влияния емкостной и индуктивной фаз искрового разряда. Моментом окончания формирования начального очага принимается момент равенства размера начального очага интегральному масштабу турбулентности.

Интерес к формированию начального очага (НО) горения обусловлен его важной ролью в формировании процесса сгорания в двигателях с внешним смесеобразованием топливовоздушной смеси (ТВС) и воспламенением ее электрической искрой. Продолжительность формирования НО горения составляет значительную долю всего времени процесса сгорания в этих ДВС. Под этой продолжительностью понимается период от пробоя межэлектродного зазора свечи зажигания до того момента, когда размер НО становится сопоставимым с интегральным масштабом турбулентности, который для цилиндра ДВС определяется размером камеры сгорания, ее формой и геометрическими параметрами впускного клапана [1, 2]. По мнению многих авторов [3, 4] именно динамика формирования НО горения определяет межцикловую нестабильность всего процесса сгорания. По мнению большинства исследователей для повышения цикловой стабильности процесса сгорания, позволяющей расширить пределы эффективного обеднения ТВС, следует добиваться интенсификации развития процесса горения на начальном этапе.

На основе собственных исследований [5, 6] и результатов, полученных другими авторами [7], процесс формирования НО горения в зависимости от источника получаемой им энергии разделяется на три периода. Первый период, называемый периодом формирования ядра воспламенения (ЯВ), длится от момента пробоя межэлектродного зазора до начала интенсивного протекания горения ТВС в формирующемся НО.



В течение этого периода используется энергия, накопленная в электрических емкостях элементов вторичной цепи системы зажигания.

Затем наступает второй период, в течение которого формирующийся НО горения получает энергию, выделяющуюся как в индуктивной фазе разряда, так и в результате горения ТВС. Продолжительность этого периода равна длительности индуктивной фазе разряда. После прекращения разряда наступает третий период, в течение которого развитие НО горения обеспечивается только энергией, выделяющейся в результате горения ТВС. Третий период длится до тех пор, пока размер НО горения не станет соизмерим с интегральным масштабом турбулентности. Предполагается, что горение ТВС во втором и третьем периодах формирования НО горения подчиняется законам ламинарного горения [8]. После завершения третьего периода начинается основное горение, протекающее по турбулентному механизму.

Рассмотрим первый период формирования НО горения — период формирования ядра воспламенения, который, как сказано выше, начинается с пробоя межэлектродного зазора. При пробое за несколько наносекунд образуется токопроводящий канал диаметром  $d_k$  около 40 мкм. Выделяющаяся при этом энергия приводит практически к мгновенному росту температуры до величин порядка  $10^4$  К и давления до значений порядка  $10^2$  бар [7]. При таких температурах практически все молекулы диссоциируют, на что расходуется значительная часть энергии емкостной фазы разряда, так что на повышение тепловой внутренней энергии, т. е. температуры ТВС, в канале расходуется лишь около 50 % выделившейся в этой фазе энергии  $E_{em}$ , которая определяется по формуле

$$E_{\text{ем}} = \frac{C_2 U_{\text{пр}}^2}{2}, \quad (1)$$

где  $C_2$  — емкость элементов вторичной цепи зажигания;  $U_{\text{пр}}$  — пробивное напряжение.

До начала расширения плазменного канала можно, по мнению авторов, принять процесс изохорным, причем считается [9], что плотность и другие термодинамические параметры по сечению и длине канала постоянны.

Закон сохранения энергии в этом процессе можно записать в виде

$$U_0 + \frac{C_2 U_{\text{пр}}^2}{2} \eta = U_1, \quad (2)$$

где  $\eta$  — тепловой КПД емкостной фазы разряда;  $U_0$  — внутренняя тепловая энергия ТВС перед пробоем;  $U_1$  — внутренняя тепловая энергия ТВС после пробоя к началу расширения плазменного канала.

Если принять гипотезу о том, что стенки искрового канала являются жесткими, можно считать, что масса ТВС в канале пробоя сохраняется вплоть до завершения первого периода воспламенения — периода формирования ядра воспламенения.

Внутренняя тепловая энергия к началу расширения искрового канала может быть записана так:

$$U_1 = m_{\text{к}} \cdot c_v(T_1) \cdot T_1, \quad (3)$$

где  $m_{\text{к}}$  — масса ТВС в канале пробоя (в ядре воспламенения);  $c_v(T_1)$  — массовая изохорная теплоемкость, представленная как функция температуры.

Статистическая обработка данных [10] для диссоциированного воздуха в интервале температур от 1500 до 6000 К позволила представить функцию  $c_v(T_1)$  в следующем виде (кДж/кг · К):

$$c_v = 0,8855 \cdot \ln(T_1) - 5,6283. \quad (4)$$

Из-за отсутствия надежных данных о значениях  $c_v$  при  $T > 6000$  К зависимость (4) была экстраполирована в область  $T > 6000$  К.

Давление и температуру ТВС к началу расширения плазменного канала можно определить, опираясь на зависимости для изохорного процесса и формулы (1–4).

В последующем канал расширяется со сверхзвуковой скоростью, а температура и давление ТВС в нем снижаются. В связи с высокой скоростью расширения теплообменом с окружающей средой можно пренебречь, т. е. считать процесс адиабатным.

Отметим, что для адиабатного процесса по отношению к внешней среде описанный процесс

протекает с внутренним подводом тепла вследствие рекомбинации ионов и радикалов, возникших при пробое. Как показали расчеты авторов, показатель адиабаты в этом процессе оказывается равным примерно 1,2.

Когда температура достигнет значения  $T \approx 3000$  К, создаются условия для образования в результате экзотермических химических реакций конечных продуктов горения с соответствующим выделением теплоты. Этим заканчивается первый период формирования НО горения, т. е. формирование ядра воспламенения. Его объем  $V_2$  можно определить по известным термодинамическим зависимостям для адиабатного процесса. Принимая, что ядро воспламенения имеет сферическую форму, легко определить его радиус  $r_2$ .

Чем больше  $r_2$ , тем больше теплоты будет выделяться при последующем горении ТВС в формирующемся начальном очаге горения, тем быстрее будет происходить его формирование. При величине  $r_2$ , названной Я.Б. Зельдовичем критическим радиусом воспламенения  $r_{\text{кр}}$ , последующее развитие НО горения не нуждается в энергетической подпитке индуктивной фазой разряда и может целиком происходить за счет энергии, выделяющейся горящей в начальном очаге ТВС [11]. По Зельдовичу это имеет место тогда, когда

$$r_{\text{кр}} \geq 3\delta_{\text{лп}}, \quad (5)$$

где  $\delta_{\text{лп}}$  — толщина фронта ламинарного пламени.

В свою очередь величина  $\delta_{\text{лп}}$  обратно пропорциональна нормальной скорости ламинарного пламени  $u_{\text{н}}$ :

$$\delta_{\text{лп}} = a / u_{\text{н}}, \quad (6)$$

где  $a$  — коэффициент температуропроводности ТВС.

Как видно, чем меньше  $u_{\text{н}}$ , тем толще оказывается фронт пламени, тем больше значение  $r_{\text{кр}}$ . Известно, что  $u_{\text{н}}$  зависит от состава смеси. При стехиометрическом составе бензиновой смеси  $\delta_{\text{лп}} \approx 0,8$  мм и  $r_{\text{кр}} \approx 2,4$  мм. Величины  $\delta_{\text{лп}}$  и  $r_{\text{кр}}$  увеличиваются как с обеднением, так и с обогащением ТВС.

Из литературных источников [7] и предлагаемой методики определения  $r_2$  следует, что величина радиуса ядра воспламенения не зависит от состава смеси и целиком определяется значением пробивного напряжения  $U_{\text{пр}}$ .

Для работающего двигателя характерен разброс значений  $U_{\text{пр}}$  от цикла к циклу. Это хорошо видно на примере гистограммы (см. рисунок), полученной при испытаниях двигателя ВАЗ-21083 [12]. Соответственно вариациям  $U_{\text{пр}}$  меняются и значения  $r_2$ . Для иллюстрации этого

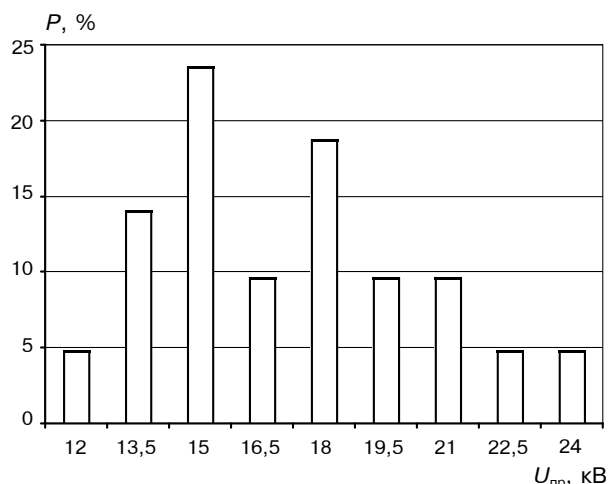


Рис. Пример гистограммы пробивных напряжений: двигатель ВАЗ-21083,  $n = 2500$  об/мин,  $M_e = 40$  Нм

Таблица

Значение  $r_2$  для различных величин пробивного напряжения

$U_{пр}$	5	10	15	20	25
$r_2$	0,1	0,1	1,0	2,1	3,7

положения в таблице приведены значения  $r_2$  для различных величин пробивного напряжения (межэлектродный зазор 1 мм, показатель адиабаты 1, 2).

Поскольку не удается в каждом цикле соблюсти условие (5), то это обстоятельство компенсируется в течение второго периода формирования НО горения энергией, выделяющейся в индуктивной фазе разряда.

Рассмотрим второй период формирования НО. Моделирование процессов в этот период происходит при следующих предпосылках и допущениях:

- газы идеальные;
- давление ТВС в НО горения постоянно;
- удельные изобарные теплоемкости постоянны;
- скорости конвективных потоков малы по сравнению со скоростью звука;
- пренебрежительно малы вязкостные и объемные силы, а также влияние излучения;
- не учитываются эффекты Сорэ и Дюфора;
- НО горения получает энергию как в ходе индуктивной фазы разряда, так и в результате горения ТВС в его объеме;
- отвод теплоты из НО горения происходит как в электроды свечи зажигания, так и в зону прогрева фронта пламени.

Моделирование этих периодов ведется на базе уравнений неразрывности, записанных для сферической системы координат. Достаточно

детально эти периоды формирования НО горения были рассмотрены в [13].

Моделирование третьего периода отличается от второго тем, что после завершения искрового разряда НО горения получает энергию только в результате горения ТВС. Принимаем, что из-за большой толщины слоя, отделяющего фронт пламени от электродов, теплота в них не передается. В результате уравнение энергии при его применении для третьего периода развития НО не содержит этих слагаемых.

В целом описанная выше модель является развитием модели, разработанной в [13]. Ее отличие состоит в описании начального периода воспламенения и образования начального ядра воспламенения, что напрямую связано с пробивным напряжением и вариациями его величины.

Из гистограммы и таблицы следует, что со снижением  $U_{пр}$  быстро убывает величина радиуса начального ядра воспламенения. Начиная с определенной величины, дальнейшее уменьшение  $U_{пр}$  приводит к тому, что  $r_2$  становится меньше  $r_{кр}$ . Успешное воспламенение становится в этом случае возможным за счет выделения энергии в индуктивной фазе разряда, имеющего место во втором периоде формирования НО горения. Эта энергия необходима практически на всех режимах работы двигателя с искровым воспламенением ТВС, чтобы компенсировать нестабильность  $U_{пр}$ , исключив пропуски воспламенения. Модель объясняет, почему особенно остро это проявляется на малых нагрузках и обусловлена снижением плотности ТВС. Последнее вызывает уменьшение  $U_{пр}$  и приводит к тому, что  $r_2$  становится значительно меньше  $r_{кр}$ . Поэтому на таких режимах становится заметной роль форсирования параметров индуктивной фазы разряда.

Модель объясняет также причину того, что роль индуктивной фазы разряда возрастает по мере обеднения ТВС: с ростом коэффициента избытка воздуха, вызывающего изменение нормальной скорости ламинарного пламени, в соответствии с (6) возрастает его толщина  $\delta_{пр}$  и соответственно увеличивается, как видно из (5), величина критического радиуса. Это требует выделения большей энергии в индуктивной фазе разряда.

#### Литература

1. Bloss W., Herweg R., Ziegler G. Untersuchung der Flammer. — Kernbildung in Ottomotor // MTZ. — 1990. — V. 51, № 5 — P. 202–209.
2. Loye A.O., Bracco F.V. Two-Dimensional visualization of premixed charge flame structure in an IC Engine // SAE Tech. Pap. Ser. — 1987. — № 870454. — 36 p.

3. Bates S. Flame imaging studies in a spark-ignition four-stroke internal combustion engine // SAE Tech. Pap. Ser. — 1989. — № 890154. — 16 p.

4. Yong M. Ciclic dispersion in the homogeneous - charge spark ignition engine — a liyerature survey // SAE Tech. Pap. Ser. — 1981. — № 810020. — 25 p.

5. Злотин Г.Н., Гибадуллин В.В., Федянов Е.А., Шумский С.Н., Захаров Е.А., Свитачев А.Ю. Форсирование развития начального очага горения в ДВС с искровым зажиганием // Наука производству. — 2000. — № 1. — С. 24–26.

6. Злотин Г.Н., Лебедев Г.А., Воспламенение топливовоздушных смесей одноэлектродными свечами зажигания // Двигателестроение. — 2000. — № 4. — С. 10–11.

7. Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями / Т.У. Асмус, К. Боргнакке, С.К. Кларк и др.; под ред. Д. Хиллиарда, Дж.С. Спрингера; пер. с английского. — М.: Машиностроение, 1988. — 504 с.

8. Ujiie Yasushige Spark ignition properties of combustion mixture under high — turbulence intensity conditions // JSME Inf. J. B. — 1994. — № 3. — С. 611–617.

9. Брагинский С.И. К теории развития канала искры // ЖЭТФ. — 1958, № 6. — С. 1548–1557.

10. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей, 1972.

11. Зельдович Я.Б., Симонов Н.Н. Теория искрового воспламенения газовых взрывчатых смесей // Журнал физической химии. — 1949. — Т. XXIII, вып. 11. — С. 1361–1374.

12. Моисеев Ю.И. Статистические характеристики пробивного напряжения на свечах зажигания легкого топлива: Дис. ... канд. техн. наук — Волгоград: ВолгГТУ, 2000. — 139 с.

13. Шумский С.Н. Форсирование начальной фазы сгорания в ДВС за счет воздействия на процесс искрового воспламенения топливовоздушных смесей: Дис. ... канд. техн. наук — Волгоград: ВПИ, 1987. — 251 с.

## НА ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАВОДАХ РОССИИ

### Новости ОАО РУМО

В феврале этого года в Москве состоялся VII Международный салон инноваций и инвестиций, на котором РУМО получило серебряную медаль и диплом «За разработку суперэкономичной безопасной системы теплоснабжения многоквартирного дома: симбиоз крышного автоматизированного теплогенератора и квартирных индивидуальных тепловых пунктов». Работа специалистов котельного оборудования была представлена на международном салоне в Женеве. За разработку газовой многофакельной горелки для экономичных и безопасных систем отопления жилых помещений ОАО РУМО получило золотую медаль, а за разработку водогрейного котла для экономичных и безопасных систем отопления жилых помещений — серебряную медаль. Кроме того, за активное содействие научно-техническому прогрессу и высокие достижения на 35-м международном салоне изобретений, новой техники и товаров ОАО РУМО присужден диплом Министерства образования и науки Российской Федерации. Стенд ОАО РУМО входил в состав нижегородского стенда.

[www.rumo.nnov.ru](http://www.rumo.nnov.ru)

### Новости ОАО ЗМЗ

ОАО «Заволжский моторный завод» (входит в холдинг ОАО «Северсталь-авто») в первом полугодии 2007 г. по сравнению с аналогичным периодом прошлого года увеличило выручку от всех видов деятельности на 14,6%, доведя ее до 7,7 млрд руб.

При этом производство двигателей возросло на 2,2%. Всего за первое полугодие было произведено 123 174 двигателя всех модификаций

для комплектации автомобилей ГАЗ, УАЗ, ПАЗ и реализации на вторичном рынке, из них 101 194 бензиновых четырехцилиндровых двигателя семейства 406 (рост на 5,5%). Малолитражных дизельных ЗМЗ-5143 (2,24 л) было выпущено 2 235 шт., что в 3 раза больше, чем в первом полугодии 2006 г.

Дизельные двигатели поставляются на УАЗ для комплектации внедорожников «Hunter». Поставки заволжского дизеля для комплектации модельного ряда УАЗа в этом году будут расширены.

Кроме того, ОАО ЗМЗ в сентябре 2007 г. начинает поставки на вторичный рынок двух новых ремонтных комплектов для водяного насоса V-образных 8-цилиндровых двигателей. Все детали, входящие в новые ремонтные комплекты, оригинальные, прошли все необходимые испытания и сертифицированы. Прогнозный годовой объем продаж — 8 млн руб.

[www.zmz.ru](http://www.zmz.ru)

### Новости ОАО ВДМ

Специалистами ОАО «Волжский дизель им. Маминых» (ВДМ) проведены испытания двухтопливной системы питания GTI-II производства фирмы «Altronic» для двигателей двойного топлива (газодизелей). Цель испытаний — проверка возможности работы системы GTI-II на серийном газодизеле производства ОАО ВДМ в составе дизель-генератора.

По результатам испытаний принято решение об установке на серийных дизель-генераторах ОАО ВДМ двухтопливных систем фирмы «Altronic» разных модификаций в зависимости от мощности дизеля.

[www.vdm-plant.ru](http://www.vdm-plant.ru)