

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАЖИГАНИЯ БЕНЗИНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Джон Хуан Сон, Дэ Хи Ли

Индже университет в Кимхе, Кённам, Корея, hearphone@hanmail.net

Измерены характеристики развития ядра пламени в предварительно перемешанной бензиновоздушной смеси в цилиндрической камере сгорания постоянного объема. Эксперименты проведены при начальной температуре 393 К, давлении 6 бар и эквивалентном отношении $\Phi = 0,8$ с использованием различных систем зажигания и типов свечей. Представлены шлирен-фотография процесса, проанализированы результаты измерения скорости пламени, скорости тепловыделения и массовая доля выгоревшего топлива.

Ключевые слова: развитие ядра пламени, система зажигания, камера сгорания постоянного объема, скорость тепловыделения, сгоревшая массовая доля.

ВВЕДЕНИЕ

Детальное изучение процесса горения в двигателях внутреннего сгорания необходимо для улучшения его энергетических характеристик и уменьшения вредных выбросов. При этом важное значение имеет исследование переходных физических и химических процессов в камере сгорания. Для этой цели используют различные методы диагностики. Так, в работе [1] с помощью термоанемометра измеряли локальную скорость потока. Другой способ — установка на стенках камеры сгорания ионизационного датчика для регистрации прихода фронта пламени. С развитием диагностической техники для исследований характеристик потока и процесса горения в камере сгорания двигателя все чаще применяют оптические методы. Так, в [2] течение смеси в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания исследовалось лазер-доплеровским измерителем скорости. Распределение топлива и распространение пламени в камере сгорания изучалось в работах [3, 4] с использованием методов рэлеевского рассеяния, рассеяния Ми, лазерно-индуцированной флуоресценции и т. д.

Однако из-за турбулентности пламени трудно оценить воздействие системы воспламенения и энергии воспламенения на распространение пламени. Исследователи пытаются устранить турбулентность или неодно-

родное распределение смеси на начальном этапе инициирования горения и распространения пламени за счет неподвижности смеси и ее однородности. Эти условия могут быть выполнены при использовании камеры сгорания постоянного объема [5]. Преимущества эксперимента в такой камере — легкость контроля начальных состояний и возможность визуализации распространения пламени. В частности, эксперимент в камере сгорания постоянного объема ценен тем, что позволяет изучать развитие ядра пламени.

В данной работе анализируется воздействие энергии воспламенения и геометрии системы воспламенения на начальное развитие ядра пламени в камере сгорания постоянного объема. Были спроектированы и изготовлены три системы воспламенения различного типа и несколько видов свечей зажигания. Распространение пламени контролировалось шлирен-методом и измерением давления.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1.1. Камера сгорания постоянного объема

На рис. 1 показана схема камеры сгорания. Камера изготовлена из дюралюминия. Ее радиус 100 мм, ширина 30 мм. Кварцевые окна расположены с обеих сторон камеры. Бензиновоздушная смесь температурой 120 °С и давлением 6 бар поступала в камеру сгорания из

Jeonghoon Song and Dae Hee Lee, School of Mechanical and Automotive Engineering, Inje University, 607 Obang-dong, Kimhae, Kyungnam 621-749, Korea.

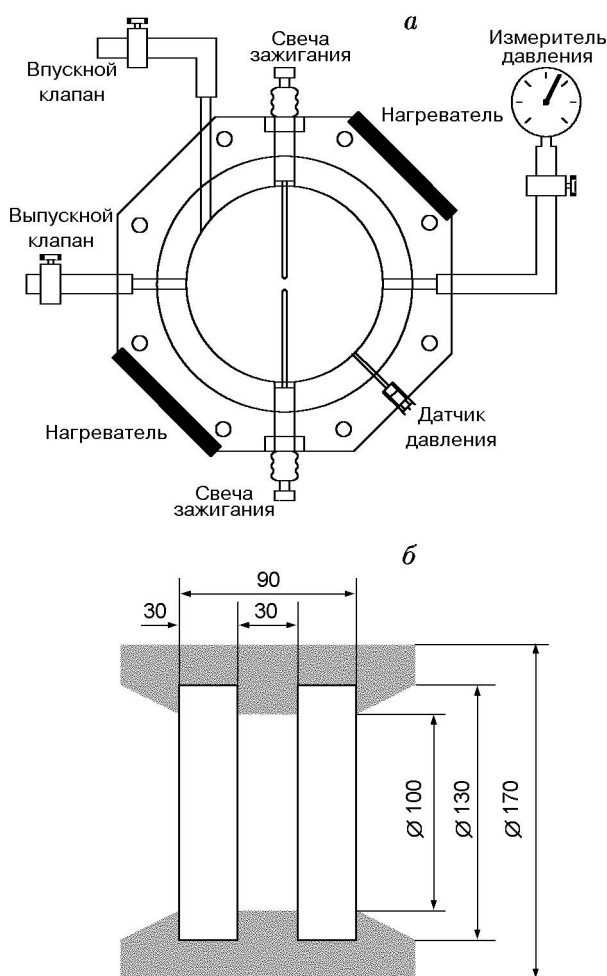


Рис. 1. Схема камеры сгорания постоянного объема

камеры предварительно подогрева, изготовленной из латуни и оснащенной двумя нагревателями мощностью 600 и 400 Вт. Объем камеры предварительного смешения $2,65 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. В ней бензин испарялся, а его пары перемешивались с воздухом. Начальная температура смеси в камере сгорания поддерживалась на уровне 120°C . Смесь поджигалась спустя 3 мин после ее ввода в камеру.

Давление в камере сгорания регистрируется системой сбора данных, изображения пламени записываются на жестком диске IBM PC. Контроллер времени срабатывания искры синхронизируется с цифровой камерой, аналого-цифровым преобразователем, системой воспламенения и управляет временем замыкания контактов, чем регулируется энергия разряда.

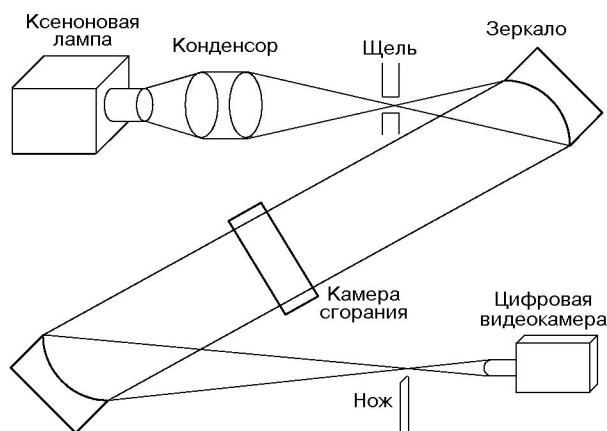


Рис. 2. Схема шлирен-метода

1.2. Контроль соотношения воздух — топливо

Камера предварительного нагрева разработана так, чтобы обеспечить контроль соотношения воздух — топливо. Объем камеры предварительного подогрева измерен, а количество бензина для каждого значения эквивалентного соотношения (коэффициента избытка топлива) рассчитывалось с помощью уравнения

$$m_f = \Phi m_a \cdot 6,803 \cdot 10^{-2} = \Phi \frac{p 922,7}{T + 273} 6,803 \cdot 10^{-2} \text{ [г]}, \quad (1)$$

где m_f — масса топлива, m_a — масса воздуха, p и T — давление и температура в камере предварительного подогрева, Φ — эквивалентное соотношение, $6,803 \cdot 10^{-2}$ — стехиометрическое соотношение. Постоянная 922,7 вычислялась с использованием объема камеры предварительного подогрева и универсальной газовой постоянной. Масса бензина измерялась на электрических весах (Ohaus Co., TP200S), и определенное его количество подавалось в камеру предварительного подогрева импульсом инжектора. Эксперименты проведены при $\Phi = 0,8$, поскольку в обедненной смеси система воспламенения сильнее влияет на процесс распространения пламени.

1.3. Диагностика изображения пламени

Распространение пламени регистрировалось шлирен-методом с помощью высокоскоростной цифровой камеры [6–8]. Система визуализации представлена на рис. 2. Источником

света служит ксеноновая лампа (300 мВт), система включает в себя также два сферических зеркала диаметром 300 мм с фокусным расстоянием 3 м. Изображения роста пламени регистрировались со скоростью 3000 кадр/с.

Радиус пламени и его площадь вычислялись с помощью пакета программ для обработки изображений Matrox-Inspector. Скорость распространения пламени рассчитывалась по измеренным радиусам.

1.4. Анализ тепловыделения и доли сгоревшего топлива по результатам измерения давления сгорания

Скорость тепловыделения и массовая доля сгоревшей смеси рассчитываются по результатам измерения давления пьезоэлектрическими датчиками.

1.4.1. Скорость тепловыделения (dq/dt)

Скорость тепловыделения в камере сгорания определялась с использованием первого закона термодинамики [9]. При этом предполагается, что изменение давления связано с химической энергией, выделенной сгоревшей смесью.

В данной работе скорость тепловыделения рассчитывалась по следующему уравнению:

$$\dot{q} = v \frac{c_v}{R} \frac{dp}{dt} + \dot{q}_{loss}, \quad (2)$$

где v — объем камеры, c_v — теплоемкость при постоянном объеме, R — универсальная газовая постоянная, p — давление в камере, t — время, \dot{q}_{loss} — потери тепла на кварцевых окнах и электродах.

По результатам экспериментов определялись значения максимальной скорости тепловыделения \dot{q}_{max} в период времени от начала воспламенения до достижения максимальной скорости тепловыделения Δt_{max} .

1.4.2. Доля сгоревшей массы

Доля сгоревшей топливоздушнoй смеси рассчитывалась по профилю измеренного давления в предположении, что давление в камере сгорания соответствует доле сгоревшей массы. При этом использовалось соотношение (5) из работы [7]:

$$M(t) = \frac{p(t) - p_{init}}{p_{max} - p_{init}}, \quad (3)$$

где p_{init} — начальное давление, p_{max} — максимальное давление.

Продолжительность развития ядра пламени t_{0-10} определена как период времени от воспламенения до сгорания 10 % массы, а продолжительность распространения пламени t_{10-90} — как период времени, начинающийся после сгорания 10 % и до сгорания 90 %. Время t_{max} соответствует периоду от воспламенения до полного сгорания всей смеси в камере сгорания.

1.5. Системы воспламенения и свечи зажигания

Для анализа воздействия системы воспламенения на характеристики распространения пламени разработаны и изготовлены устройства DIS (прямое воспламенение), HEIS (высокоэнергетическое воспламенение — вторичная цепь соединена последовательно) и HEIP (высокоэнергетическое воспламенение — вторичная цепь соединена параллельно). DIS — обычная система воспламенения, управляемая двумя свечами зажигания с одной катушкой воспламенения. Системы HEIS и HEIP разработаны с целью увеличить длительность разряда и энергию воспламенения DIS за счет модификации первичной и вторичной цепей DIS. Системы HEIS и HEIP построены с двумя катушками воспламенения для двух свечей зажигания. Детальные схемы цепей представлены в [10].

Две свечи зажигания устанавливались на верху и на дне камеры сгорания. Электрод заземления обычного J-типа удалялся, а центральные электроды продвигались к центру камеры сгорания (см. рис. 1). В экспериментах использовалось несколько различных видов свечей зажигания.

Характеристики системы электродов (ширина зазора, материал, диаметр и форма электродов) представлены в табл. 1.

Энергия воспламенения рассчитывалась по уравнению

$$E = \int_0^{\tau} V I dt. \quad (4)$$

Ток I и напряжение V измерялись датчиками тока (Tektronix A6303) и напряжения (Tektronix P6015) примерно 200 раз во всех экспериментах.

Таблица 1
Условия экспериментов

Переменные	Условия
Системы воспламенения	DIS, HEIS, HEIP
Времена замыкания контактов	1,5, 2,5, 3,5 мс
Межэлектродный зазор	0,8, 1,2, 2,0 мм
Материал электрода	Сu, Ni, W
Диаметр электрода	1,2, 2,0, 2,8 мм
Форма электрода	Плоский, острый

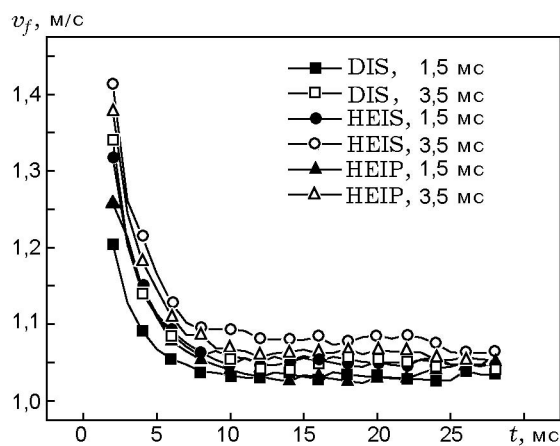


Рис. 3. Влияние времени замыкания контактов и систем воспламенения на распространение пламени:

вольфрамовые электроды диаметром 2,0 мм, ширина зазора между электродами 1,2 мм

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Шлирен-фотографии пламени представлены в табл. 2, 3. Средние значения скорости распространения пламени также представлены на рис. 3–7. Энергии разряда и давления сгорания измерены 20 раз для каждого условия эксперимента.

2.1. Воспламенение и системы воспламенения

Процесс разряда, генерируемый используемыми системами воспламенения, может быть разделен в соответствии с электрическими характеристиками на фазы пробоя, дугового и тлеющего разряда.

Согласно исследованиям [9–14] фаза пробоя характеризуется высокими напряжением и током (≈ 10 кВ, ≈ 200 А), высокими значениями температуры (до 60000 К) и давления

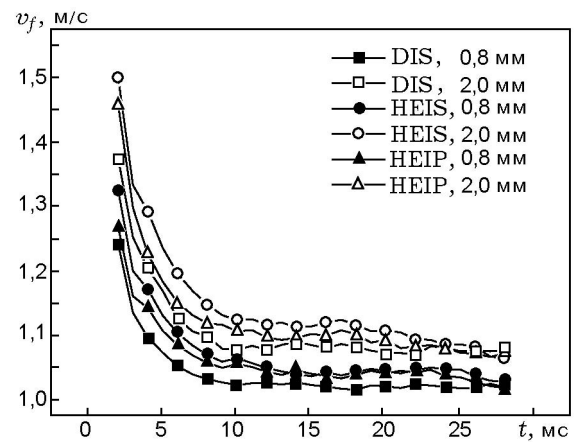


Рис. 4. Влияние межэлектродного зазора и систем воспламенения на распространение пламени:

острые вольфрамовые электроды диаметром 2,0 мм, время замыкания 3,5 мс

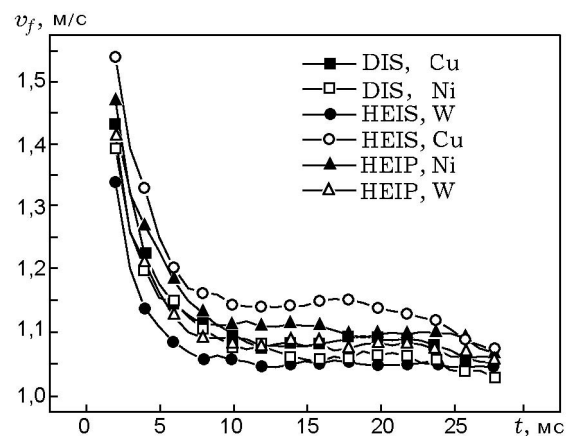


Рис. 5. Влияние материала электрода и систем воспламенения на распространение пламени:

острые электроды диаметром 2,0 мм, ширина зазора между электродами 1,2 мм, время замыкания 3,5 мс

(≈ 200 бар), которые порождают интенсивную ударную волну. Превышение возникающего давления над давлением окружающей среды определяет последующее расширение плазменного канала. Фаза пробоя, которая обеспечивает проводимость между электродами, всегда предшествует дуговому и тлеющему разрядам.

Пробой продолжается очень короткое время ($1 \div 10$ нс), но тепловая энергия, выделенная в этой фазе, оказывает воздействие в течение ≈ 1 мс. Из-за данной особенности большинство исследователей делит этот период на

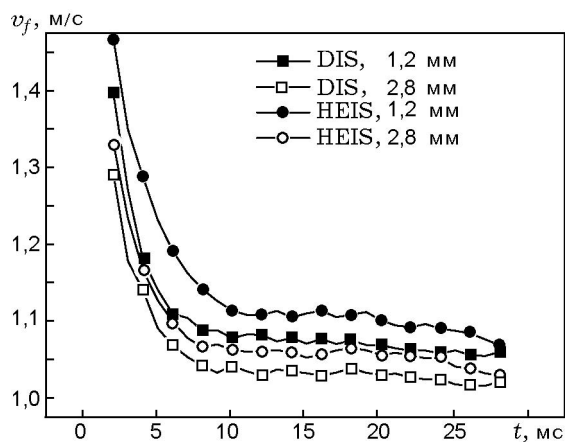


Рис. 6. Влияние диаметра электрода и систем воспламенения на распространение пламени: острые вольфрамовые электроды, ширина зазора между электродами 1,2 мм, время замыкания 3,5 мс

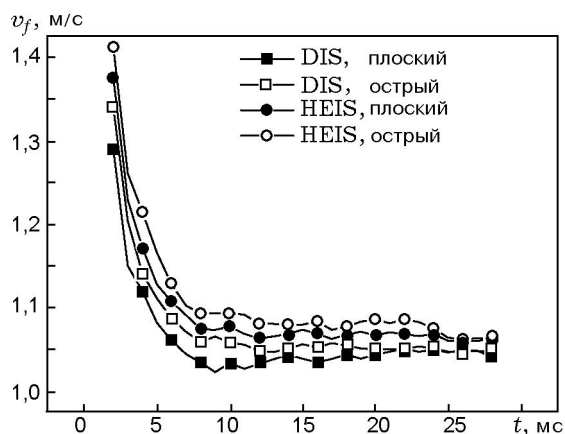


Рис. 7. Влияние формы электрода и систем воспламенения на распространение пламени: вольфрамовые электроды диаметром 2,0 мм, время замыкания 3,5 мс

две фазы. В [8] — это фаза взрывной волны и диффузионная (рассеивание) фаза, в [15] — фаза постоянного объема и фаза резкого расширения, в [16] — фаза формирования ядра и фаза развития ядра пламени. Формирование ядра всегда обеспечивается успешным пробоем, поскольку после пробоя образуется высокотемпературное ядро. После стадии формирования развитие ядра пламени определяет тепловая диффузия (рассеивание). Ядро успешно развивается, если мощности, вводимой от искры, достаточно для того, чтобы ядро пламени стало больше критического размера. Критический размер — максимальный размер яд-

ра пламени, при котором ядро распространяется самостоятельно без дополнительного ввода электрической энергии. На рост ядра влияют многие параметры, в частности: характеристики системы воспламенения, конфигурация свечи зажигания, форма камеры сгорания, распределение топлива, движение смеси и т. д.

Существует множество систем воспламенения, но обычно используются система индуктивного (IDI) и система емкостного воспламенения разряда (CDI).

Система IDI увеличивает продолжительность разряда и энергию воспламенения для усиления роста начального ядра пламени. В катушке запасается большая энергия и более 90 % энергии высвобождается в дуговой или тлеющей фазе разряда. При увеличении длительности разряда изменение соотношения воздух — топливо или турбулентности, особенно вокруг свечи зажигания, меньше воздействуют на развитие начального ядра. При этом снижается вероятность осечки и частичного сгорания и увеличивается стабильность роста ядра. IDI является основной системой воспламенения, используемой для автомобиля, но для увеличения продолжительности разряда необходимо увеличить размер катушки. Если в течение тлеющей фазы ток увеличивается выше 200 мА, происходит переход в дуговую фазу, при этом наблюдается плавление электродов.

Система CDI запасает энергию воспламенения в конденсаторе и катушке, и очень быстро высвобождает ее. В системе CDI используется фаза пробоя для зажигания смеси за счет увеличения напряжения пробоя и тока. Эффективность (КПД) перехода электрической энергии в тепловую относительно высока и выгодна для быстрого горения [11, 17–19]. Из-за короткого времени замыкания контактов и быстрого горения система CDI обычно используется в мотоцикле.

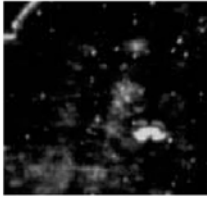
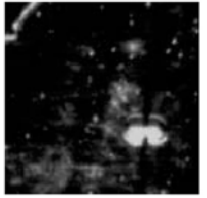
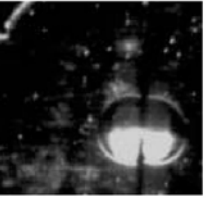
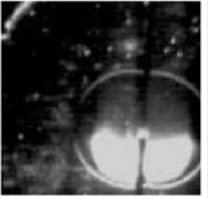

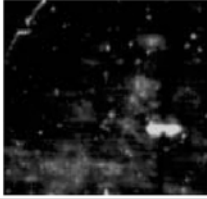
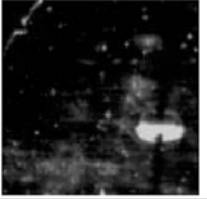
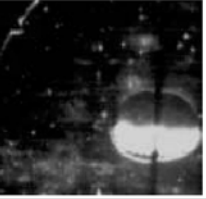
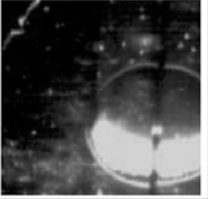
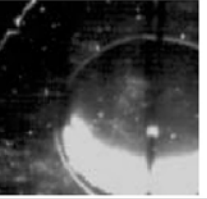




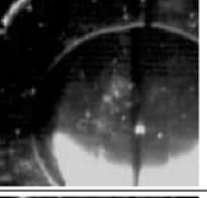



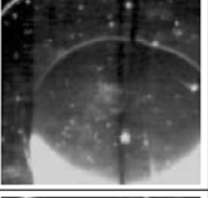



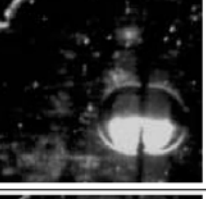
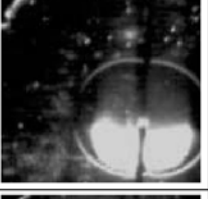
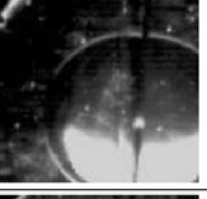


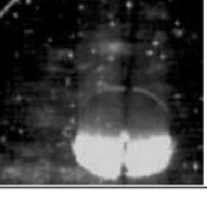
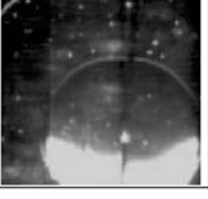

Выполнено множество сравнительных экспериментов с системами IDI и CDI. В [19] сделан вывод, что увеличение продолжительности разряда предпочтительнее для зажигания бедной смеси в случае, когда система воспламенения не может разрядить большую часть энергии за несколько наносекунд (см., например, результаты работ [11, 17, 18]).

2.2. Влияние времени замыкания контактов на распространение пламени

Табл. 2–4 показывают, как изменяется

Таблица 2

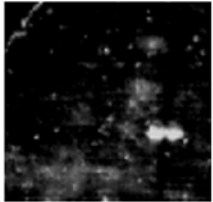
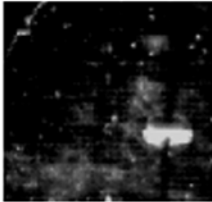
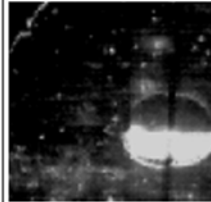
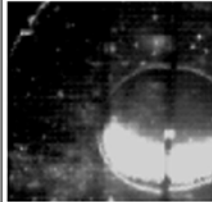
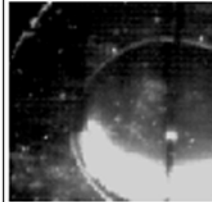
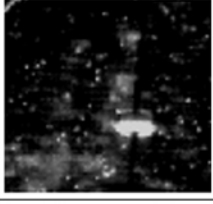
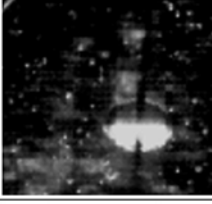
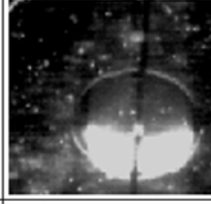
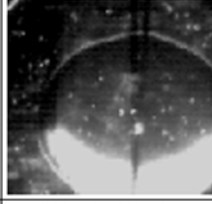
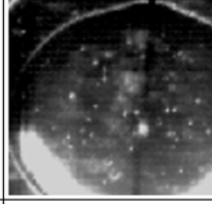
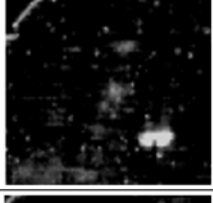
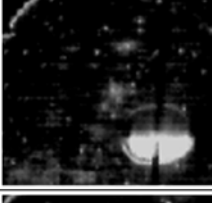
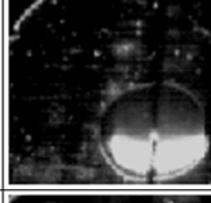
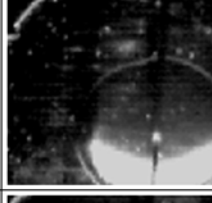
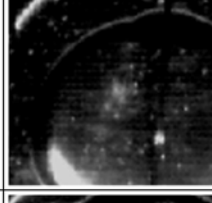
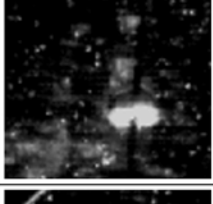
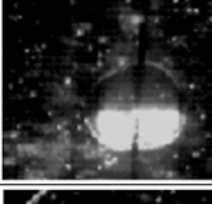
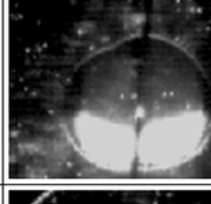
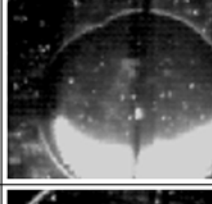
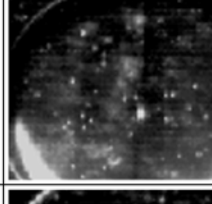

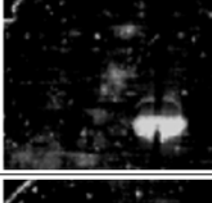
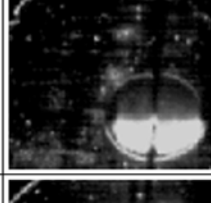
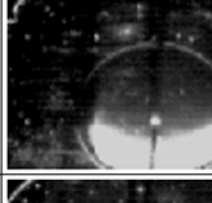
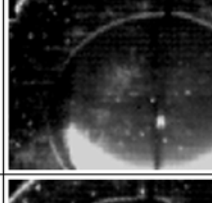


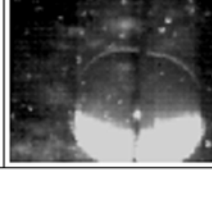
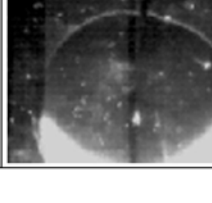

Распространение пламени при варьировании ширины зазора между электродами

Система	t_{dwell} , мс	$t = 3$ мс	5 мс	10 мс	15 мс	20 мс
DIS	1,5					
	3,5					
HEIS	1,5					
	3,5					
HEIP	1,5					
	3,5					

Примечание. Давление 6 атм, температура 120 °С, ширина зазора между электродами 1,2 мм, острые вольфрамовые электроды диаметром 2,0 мм.

Таблица 3

Распространение пламени при варьировании времени замыкания

Система	Зазор, мм	$t = 3$ мс	5 мс	10 мс	15 мс	20 мс
DIS	0,8					
	2,0					
HEIS	0,8					
	2,0					
HEIP	0,8					
	2,0					

Примечание. Давление 6 атм, температура 120 °С, острые вольфрамовые электроды диаметром 2,0 мм, время замыкания 3,5 мс.

Таблица 4

Изменение энергии воспламенения, максимальной скорости тепловыделения, времени до момента достижения максимальной скорости тепловыделения, времени от начала горения до сгорания 10 % массы топлива и от момента сгорания 10 % топлива до 90 %, времени до достижения максимального давления для всех исследуемых условий эксперимента

$\Phi = 0,8$		Время замыкания, мс		Ширина зазора, мм			Электрод							
							Материал			Диаметр, мм			Форма	
Условия		1,5	3,5	0,8	1,2	2,0	Cu	Ni	W	1,2	2,0	2,8	плоский	острый
E , мДж	DIS	9,6	15,8	11,8	15,8	20,5	17,3	16,3	15,8	16,7	15,8	15,1	14,8	15,8
	HEIS	17,6	29,2	23,4	29,2	39,3	31,2	29,8	29,2	30,8	29,2	27,2	26,8	29,2
	HEIP	15	21,1	15,1	21,1	29,1	—	—	21,1	—	21,1	—	—	21,1
\dot{q}_{\max} , кДж/(с·кг)	DIS	44,3	47,9	45,4	47,9	50,6	49,2	48,8	47,9	49,3	47,9	46,0	45,0	47,9
	HEIS	47,0	50,5	47,7	50,5	53,3	53,0	51,8	50,5	51,4	50,5	48,8	48,7	50,5
	HEIP	45,2	49,2	46,5	49,2	52,0	—	—	49,2	—	49,2	—	—	49,2
Δt_{\max} , мс	DIS	66	64	66	64	61	61	62	64	62	64	65	66	64
	HEIS	64	62	63	62	58	59	60	62	60	62	63	63	62
	HEIP	64	63	64	63	59	—	—	63	—	63	—	—	63
t_{0-10} , мс	DIS	32	30	32	30	28	28	29	30	29	30	31	31	30
	HEIS	28	26	28	26	24	25	25	26	25	26	26	27	26
	HEIP	30	27	29	27	25	—	—	27	—	27	—	—	27
t_{10-90} , мс	DIS	33	32	33	32	33	33	33	32	32	32	33	34	32
	HEIS	34	33	33	33	33	32	33	33	33	33	34	33	33
	HEIP	33	33	34	33	33	—	—	33	—	33	—	—	33
t_{\max} , мс	DIS	72	69	72	69	67	68	68	69	68	69	70	72	69
	HEIS	68	66	68	66	64	65	65	66	66	66	68	68	66
	HEIP	70	67	69	67	65	—	—	67	—	67	—	—	67

процесс распространения пламени, когда время замыкания увеличивается с 1,5 до 3,5 мс. Вообще, при увеличении времени замыкания возрастает и энергия разряда, о чем свидетельствуют эксперименты: при увеличении времени замыкания с 1,5 до 3,5 мс энергия воспламенения увеличилась с 9,6 до 15,8 мДж для системы DIS, с 17,6 до 29,1 мДж для системы HEIS и с 15 до 21,1 мДж для системы HEIP. При увеличении энергии воспламенения рост ядра становится более быстрым.

Плазма, возникшая в процессе пробоя, расширяется в ядре пламени за счет диффузии тепла. Однако скорость роста быстро замедляется, а последующее нарастание ядра пламени идет за счет сгорания смеси [13]. Рис. 3 показы-

вает, что сгорание начинается спустя приблизительно $4 \div 5$ мс после пробоя, и это медленно по сравнению с таковым в двигателе внутреннего сгорания, где горение начинается приблизительно через $0,5 \div 1$ мс после пробоя [12–14]. Этот результат обусловлен в основном тем, что течение смеси в исследуемой камере сгорания постоянного объема является очень слабым, поэтому деформация ядра мала и область контакта между несгоревшей смесью и ядром тоже мала.

В табл. 2 приведены кадры, показывающие рост ядра пламени. Начальное ядро приобретает эллиптическую форму из-за взрывного выделения энергии разряда и влияния электрода. Расширяясь, оно приобретает круглую

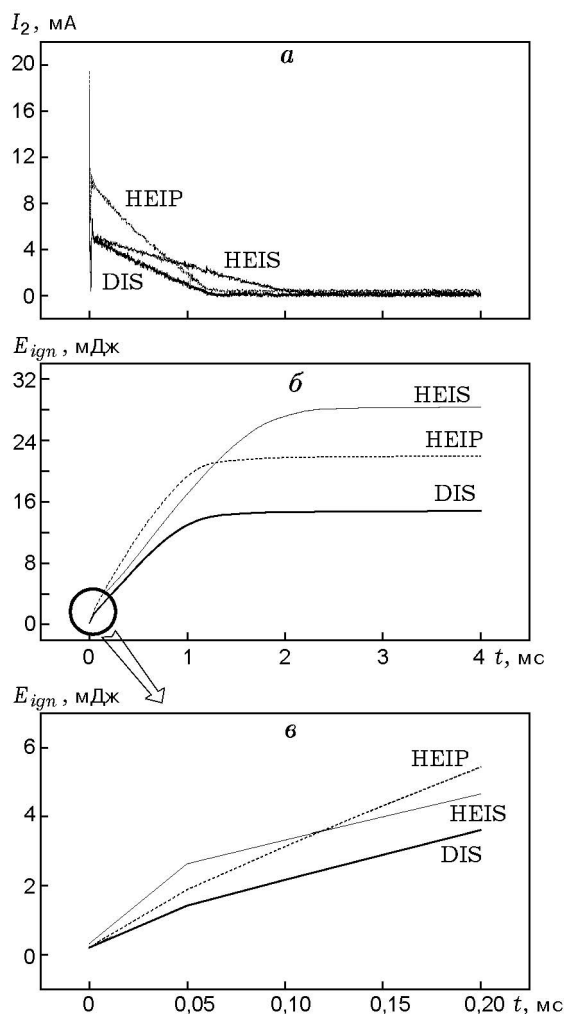


Рис. 8. Ток во вторичной обмотке и энергия инициирующих систем DIS, HEIS и HEIP при давлении 6 атм, температуре 150 °С и времени замыкания контактов 3,5 мс

форму и превращается в большое ламинарное пламя. При замене системы воспламенения DIS на HEIS или при увеличении времени замыкания от 1,5 до 3,5 мс ядра становятся больше и более круглой формы по сравнению с вышеописанным.

2.3. Воздействие системы воспламенения на распространение пламени

Ранее было установлено, что характеристики разряда, которые определяются системой воспламенения, влияют на рост пламени. На рис. 8 приведены токи воспламенения и энергии трех систем воспламенения. Из рис. 8, а

видно, что продолжительность разрядов в системах DIS и HEIP почти одинакова, а в системе HEIS — примерно на 40 % больше. Ток дугового разряда и ток первого полупериода тлеющего разряда у HEIP больше, чем таковые у HEIS. Фактически энергия инициатора, выделяющаяся во второй половине тлеющей фазы, вносит небольшой вклад в рост пламени из-за малых значений тока и напряжения.

Как показывает рис. 8, б, система HEIS разряжает самую большую энергию, но нарастание энергии идет медленно. Это вызвано меньшими дуговым и тлеющим током и напряжением у HEIS по сравнению с HEIP. В то же время ток разряда и напряжение у HEIS больше, чем таковые у HEIP (рис. 8, в).

Сравнение энергий воспламенения систем HEIS и HEIP показывает, что более быстрое развитие пламени системой HEIS обусловлено более высокой энергией разряда, а дуговая и начальная энергия тлеющего разряда менее эффективны в нарастании развития пламени. Эти результаты согласуются с результатами работы [8], где сообщалось, что дополнительная энергия разряда после первых 11,5 мДж менее эффективна в увеличении размера ядра пламени. Авторы работы [6] утверждали, что при искровом воспламенении увеличение энергии искры, значительно превышающее минимальную энергию воспламенения, может привести к очень высокой видимой скорости пламени из-за расширения плазмы и кондуктивного переноса энергии от нее, причем не только на этапе до установления пламени, но также и в течение некоторого времени после того, как оно установилось.

2.4. Влияние разрядного промежутка свечи зажигания на распространение пламени

Скорость тепловыделения и доля сгоревшей массы, приведенные в табл. 4, а также фотографии в табл. 3 иллюстрируют влияние ширины зазора между электродами на рост пламени. Как видно из табл. 4, при увеличении зазора высвобождаемая при разряде энергия становится больше. Этот рост энергии может быть связан с увеличением поверхности плазмы, для поддержания которой требуется большее количество энергии, особенно в условиях, когда плотность энергии поддерживается постоянной и, как результат, постоянен темпера-

турный градиент вдоль плазменной поверхности.

Согласно результатам работ [20, 21] полная используемая в зазоре энергия удваивается, когда его ширина изменяется от 0,6 до 1,9 мм, поскольку увеличение ширины зазора увеличивает длину дуги, по дуге переносится больший ток и сохраняется почти постоянным напряжение вдоль дуги. Результаты экспериментов [22] несколько иные: полная энергия не изменялась при изменении разрядного промежутка свечи. Авторы аргументировали данное заключение тем, что при расширении промежутка увеличивается напряжение разряда, при этом скорость выделения энергии возрастает, а длительность искры становится меньше. Тогда на полную энергию воспламенения размер разрядного промежутка не влияет. В [22] также утверждается, что полная энергия зависит больше от системы воспламенения, чем от свечи зажигания. Такое объяснение оправдано, потому что различие энергий воспламенения систем DIS и HEIS очень велико из-за разной индуктивности катушек. В то же время энергии воспламенения при разрядном промежутке свечи 0,8 и 2,0 мм различаются примерно вдвое, что свидетельствует и о правильности результатов [20, 21]. Таким образом, можно сделать вывод, что при увеличении промежутка (при одинаковой и достаточной запасенной энергии в катушке воспламенения) энергия воспламенения будет увеличиваться, в противном случае она не будет изменяться или, хуже того, воспламенения вообще не будет.

На распространение пламени также влияет и эффект охлаждения, который становится меньше при увеличении промежутка. По мере увеличения зазора эффективная длина канала разряда возрастает, потери тепла от начального пламени к электродам уменьшаются, что приводит к быстрому росту пламени.

В результате увеличения энергии и расширения канала разряда объем начального ядра становится большим. Для всех трех систем воспламенения при ширине зазора 2,0 мм продолжительность стадии t_{0-10} уменьшается примерно на $13 \div 17$ %, продолжительность от воспламенения до максимума тепловыделения (Δt_{\max}) также уменьшается примерно на $3 \div 5$ % по сравнению с этими же значениями при ширине зазора 0,8 мм. Скорость расширения ядра в момент времени 2 мс после пробоя увеличивается примерно на $11 \div 13$ % (см. рис. 4).

2.5. Влияние материала электрода на распространение пламени

Табл. 4 и рис. 5 показывают, как изменяется скорость распространения пламени в зависимости от материала электрода, что, в свою очередь, свидетельствует о влиянии материала электрода на развитие пламени. В проведенных экспериментах для изготовления электродов использовались материалы, температура плавления, теплопроводность и электропроводность которых значительно различались (данные представлены в табл. 5). Так, температура плавления меди, никеля и вольфрама равна соответственно 1358, 1728 и 3660 К [23]. Энергии разряда системы DIS — 17,3, 16,3 и 15,8 мДж, системы HEIS — 30,8, 29,1 и 27,1 мДж соответственно. Видно, что чем больше температура плавления электродов, тем меньше энергия разряда.

В [24] сообщалось, что требуемая для искрового воспламенения энергия заметно уменьшается при использовании материала электрода с низкой проводимостью и низкой температурой кипения, например, кадмиевые электроды были лучше вольфрамовых. В [14] подобное соотношение было обнаружено между минимальной энергией воспламенения и температурой кипения материала электрода, но объясняли авторы такие различия значений минимальной энергии воспламенения разной длительностью прикатодного тлеющего разряда, а следовательно, разными потерями энергии к электродам. В [14] также показано, что при одинаковом зазоре между электродами влияние материала электрода на напряжение пробоя не обнаружено. Как следствие этого, постоянной оказывается доля энергии пробоя.

При более низкой температуре плавления электрода количество испускаемых к аноду электронов увеличивается, что приводит к увеличению тока. Соответственно при большем токе в фазе тлеющего разряда эта фаза трансформируется в фазу другого разряда. В последней эффективность переноса энергии выше по сравнению с тлеющей (на ≈ 20 %), что приводит к более быстрому развитию пламени. Теплопроводности каждого из электродных материалов изменяют теплотери от ядра пламени к электродам и также влияют на рост ядра. Кроме того, электропроводность изменяет эффективность переноса энергии воспламенения к смеси.

В результате при использовании медного

Таблица 5

Свойства материалов электродов

Свойства	Cu	Ni	W
Температура плавления, К	1,358	1,728	3,660
Теплопроводность, Вт/(м·к)	391	79	157
Удельная электрическая проводимость, Ом/м	$5,8 \cdot 10^7$	$1,45 \cdot 10^7$	$1,82 \cdot 10^7$

электрода максимальная скорость тепловыделения увеличивается примерно на $3 \div 5 \%$, продолжительность от воспламенения до максимальной скорости тепловыделения сокращается на $\approx 5 \%$ по сравнению со случаем использования вольфрамового электрода. Скорости пламени для систем DIS и HEIS в момент времени 2 мс после пробоя возрастают примерно на $7 \div 9 \%$ при использовании медного электрода по сравнению с вольфрамовым.

2.6. Влияние диаметра электрода на распространение пламени

Теплопроводность материала электрода по крайней мере на два порядка величины больше, чем у газа. Так как ядро разряда находится в контакте с электродами в течение всей стадии расширения, то вводимая в газ энергия частично передается электродам за счет теплопроводности, конвекции и химической рекомбинации на поверхности. Это особенно справедливо для массивных электродов [8]. Экспериментальные результаты [25] показали, что прежде всего для бедных смесей начальная скорость распространения пламени резко уменьшается при увеличении диаметра электрода.

Табл. 4 и рис. 6 показывают изменения скорости развития пламени при изменении диаметра электродов. При уменьшении диаметра электрода энергия разряда становится больше: при диаметрах 2,8, 2,0 и 1,2 мм энергии воспламенения соответственно равны 15,1, 15,8 и 16,7 мДж для системы DIS и 27,1, 29,1 и 30,8 мДж для системы HEIS (время замыкания контактов 3,5 мс, ширина электродного зазора 1,2 мм, острый вольфрамовый электрод).

Увеличенные значения энергии в фазе дугового или тлеющего разряда аналогичны полученным в [19]. Для более бедной смеси, когда теплотери к электродам становятся более значительными, больший электрод имеет меньшее преимущество для воспламенения. В экспериментах в камере постоянного объема

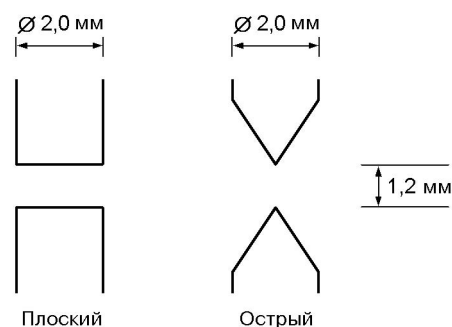


Рис. 9. Формы электродов

фаза пробоя влияет на рост ядра больше, чем дуговая или тлеющая фаза, из-за слабого течения смеси. Как следствие, доли сгоревшей массы значительно не различаются. При диаметре электрода 1,2 мм период t_{0-10} уменьшается только на $4 \div 6 \%$ по сравнению со случаем использования электрода диаметром 2,8 мм. Однако в условиях движущейся смеси (например, в камере двигателя внутреннего сгорания) считается, что диаметр электрода играет более важную роль в развитии ядра. Для электрода меньшего диаметра воздействие высокой температуры, генерируемой пламенем, негативно сказывается на нем и может привести к выводу электрода из строя. Это необходимо учитывать при применении в двигателях свечей зажигания с меньшими электродами.

2.7. Влияние формы электрода на распространение пламени

Форма электрода сильно влияет на воспламеняемость смеси. Использованные в экспериментах формы электрода показаны на рис. 9.

В [14] сообщалось, что при изменении конфигурации электрода меняется период разряда и в результате меняется эффективность переноса электрической энергии. Авторы объяснили этот факт тем, что если число испускаемых электронов с электрода одинаково, то меньший

или более острый наконечник электрода дает более высокую плотность разрядного тока, который и обеспечивает более высокую энергию пробоя и приводит к переходу тлеющей фазы в дуговую.

Результаты данной работы показывают, что при использовании более острого наконечника электрода энергия воспламенения возрастает: энергия разряда системы DIS увеличивается с 14,8 до 15,8 мДж, а для системы HEIP и HEIS — с 26,7 до 29,1 мДж; продолжительность периода t_{0-10} уменьшается на $3 \div 4$ %, период от воспламенения до максимальной скорости тепловыделения становится короче на $7 \div 9$ %. Отсюда следует, что заостренные электроды уменьшают гасящее воздействие электродов на ядро пламени и ускоряют рост ядра пламени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие основные результаты.

1. При увеличении времени замыкания контактов с 1,5 до 3,5 мс энергии разряда систем DIS и HEIS увеличиваются примерно на 65 %. Увеличенная энергия воспламенения ускоряет скорость горения. Продолжительность начальной стадии горения t_{0-10} сокращается примерно на $7 \div 8$ % (при возрастании времени замыкания).

2. Полная энергия воспламенения и энергия фазы пробоя системы HEIS больше, чем таковые у HEIP, но энергия дугового разряда и первой половины периода тлеющей фазы у HEIP выше, чем у HEIS. Поэтому быстрый рост пламени наблюдается при более высокой энергии пробоя или большей полной энергии воспламенения, а не при более высокой энергии тлеющего или дугового разряда.

3. При расширении межэлектродного промежутка от 0,8 до 2,0 мм энергия разряда системы DIS увеличивается примерно на 75 %, а системы HEIS — примерно на 68 %. Энергия разряда увеличивается пропорционально ширине зазора, что создает большее начальное ядро пламени. Период t_{0-10} для ядра пламени, развивающегося при ширине зазора 2,0 мм, примерно на $13 \div 17$ % короче, чем при ширине зазора 0,8 мм (как для DIS, так и для HEIS).

4. Материал электрода влияет на энергию разряда и эффективность преобразования электрической энергии. Энергия разряда на медном электроде (имеющем самую низкую температуру плавления среди использо-

ванных материалов электрода) увеличивается примерно на $7 \div 10$ % по сравнению с вольфрамовым электродом, имеющим самую высокую температуру плавления. В результате период t_{0-10} уменьшается примерно на $4 \div 7$ %, продолжительность от воспламенения до максимальной скорости тепловыделения уменьшается примерно на 8 % и скорость максимального тепловыделения увеличивается примерно на $7 \div 9$ %.

5. При уменьшении диаметра электрода энергия разряда увеличивается и ядро пламени растет быстрее. При диаметре 1,2 мм энергия воспламенения увеличивается примерно на $11 \div 14$ % по сравнению с использованием электрода диаметром 2,8 мм. Однако, поскольку количество энергии разряда в течение фазы пробоя при обоих диаметрах электродов примерно одинаково, скорость роста пламени не меняется так сильно, как от изменения времени замыкания контактов или ширины зазора.

6. Для заостренного наконечника электрода энергия разряда увеличивается вместе с эффективностью (КПД) преобразования электрической энергии. Как следствие, рост ядра становится быстрее. При использовании заостренного наконечника электрода период t_{0-10} становится больше примерно на $3 \div 4$ %, длительность периода от воспламенения до момента максимальной скорости тепловыделения сокращается примерно на $2 \div 3$ %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hassan H. and Dent J. C.** The measurement of air velocity in a motored internal combustion engine using a hot-wire anemometer // Proc. Intern. Mech. Eng. (IMEchE). 1971. V. 185. P. 583–591.
2. **Yoo S., Lee K., Novak M., Schock H., and Keller P.** 3-D LDV measurement of in-cylinder air flow in a 3.5L four-valve SI engine // SAE Trans. 1995. SAE Paper 950648.
3. **Fansler T. D., French D. T., and Drake M. C.** Fuel distributions in a firing direct injection spark ignition engine using laser induced fluorescence imaging // SAE Trans. 1995. SAE Paper 950110.
4. **Johansson B., Neij H., Juhlin G., and Alden M.** Residual gas visualization with laser induced fluorescence // SAE Trans. 1995. SAE Paper 952463.
5. **Bae C.** The researches on in-cylinder flow and combustion in internal combustion engines with optical access // Korean Soc. Automobile Eng. 1996. V. 18, N 1.

6. **Bradley D., Hicks R. A., Lawes M., et al.** The measurement of laminar burning velocities and markstein numbers for iso-octane-air and iso-octane-n-heptane-air mixtures at elevated temperatures and pressures in an explosion bomb // *Combust. Flame*. 1998. V. 115. P. 126–144.
7. **Fujimoto M., Nishida K., Hiroyasu H., and Tabata M.** Influence of mixture stratification pattern on combustion characteristics in a constant volume combustion chamber // *SAE Trans*. 1995. SAE Paper 952412.
8. **Lim M. T., Anderson R. W., and Arpacı V. S.** Prediction of spark kernel development in constant volume combustion // *Combust. Flame*. 1987. V. 69. P. 303–316.
9. **Heywood J. B.** *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988. Ch. 9. P. 371–490.
10. **Song J., Sunwoo M., and Kim W.** A study on the engine performance improvement of a lean burn engine by high energy ignition // *Trans. Korea Soc. Automotive Eng.* 1999. V. 7, N 2. P. 31–40.
11. **Maly R. R. and Vogel M.** Initiation and propagation of flame fronts in lean CH₄-air mixtures by the three modes of the ignition spark // 17th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1978. P. 821–831.
12. **Song J. and Sunwoo M.** A modeling and experimental study of initial flame kernel development and propagation in SI engines // *SAE Trans*. 2000. SAE Paper 2000-01-0960.
13. **Song J. and Sunwoo M.** Flame kernel formation and propagation modeling in spark ignition engines // *Proc. Intern. Mech. Eng. (IMEchE)*. Part D. 2001. V. 215. P. 105–114.
14. **Ziegler G., Wagner E., and Maly R.** Ignition of lean methane-air mixtures by high pressure glow and arc discharges // 20th Symp. (Intern.) on Combustion. IMechE Conference Publications, 1984.
15. **Sher E., Ben-Yaish J., and Kravchik T.** On the birth of spark channels // *Combust. Flame*. 1992. V. 89. P. 186–194.
16. **Ko Y., Arpacı V. S., and Anderson R. W.** Spark ignition of propane-air mixture near the minimum ignition energy. Part 1: A model development // *Combust. Flame*. 1991. V. 83. P. 88–105.
17. **Anderson R. W.** The effect of ignition system power on fast burn engine combustion // *SAE Trans*. 1987. SAE Paper 870549.
18. **Anderson R. W. and Asik J. R.** Lean air-fuel ignition system comparison in a fast-burn engine // *SAE Trans*. 1985. SAE Paper 850076.
19. **Kalghatgi G. T.** Spark ignition, early flame development and cyclic variation in I.C Engine // *SAE Trans*. 1987. SAE Paper 870163.
20. **Arcoumanis C. and Bae C.** Correlation between spark ignition characteristics and flame development in a constant-volume combustion chamber // *SAE Trans*. 1992. SAE Paper 920413.
21. **Arcoumanis C. and Bae C.** Visualization of flow/flame interaction in a constant-volume combustion chamber // *SAE Trans*. 1993. SAE Paper 930868.
22. **Daniel C. F. and Schilzo M.** The effects of electrode design on mixture ignitability // *SAE Trans*. 1996. SAE Paper 960606.
23. **Cengel Y. A.** *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill, 1997.
24. **Ballal D. R. and Lefevre A. H.** The influence of flow parameters on minimum ignition energy and quenching distance // Fifteenth Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1975. P. 1473–1481.
25. **Soete G. C.** Propagation behavior of spark ignited flames in early stages // *Intern. Conf. on Combustion in Engineering*. IMechE Conference Publications, 1983. P. 93–100.

*Поступила в редакцию 26/IX 2002 г.,
в окончательном варианте — 28/XI 2002 г.*