

УДК 621.43.04

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ ДЛЯ ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д. В. Швыдкий, асп.,

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Рассмотрены современные электронные системы зажигания для газовых двигателей. Проанализированы характеристики искровых систем зажигания.

Ключевые слова: газовый двигатель, система зажигания, искровой разряд, энергия зажигания.

СУЧАСНІ СИСТЕМИ ЗАПАЛЮВАННЯ ДЛЯ ГАЗОВИХ ДВИГУНІВ

Д. В. Швидкий, асп.,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Розглянуто сучасні електронні системи запалювання для газових двигунів. Проаналізовано характеристики іскрових систем запалювання.

Ключові слова: газовий двигун, система запалювання, іскровий розряд, енергія запалювання.

MODERN IGNITION SYSTEMS FOR GAS ENGINES

D. Schvydkiy, P. G.,

Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. Modern electronic ignition systems for gas engines are considered. Characteristics of spark ignition systems are analyzed.

Key words: gas engine, ignition system, spark discharge, ignition energy.

Введение

Для улучшения технико-эксплуатационных характеристик газового ДВС применяется концепция «бедного горения» [1]. Так как условия воспламенения топлива в данном случае ухудшаются вследствие уменьшения его количества в области первичного очага пламени, для воспламенения смеси требуется увеличение плотности подводимой энергии [2]. Соответственно, требования к системам зажигания (СЗ) в таком случае повышаются и актуальной становится проблема повышения эффективности их работы.

Анализ публикаций

Существует большое количество публикаций ведущих мировых производителей и исследователей в области технологий зажигания для газовых ДВС [3]. Анализ этих публикаций показал наличие нескольких направлений в развитии технологий зажигания, которые используют различные физические принципы

работы [3]: лазер [4], коронный разряд [5], различные виды искровых разрядов [6, 7, 8].

В области улучшения эффективности зажигания смеси следует отметить также возможность использования форкамер [13], многоточечного зажигания [9] и добавок водорода к рабочей смеси [10].

Цель и постановка задачи

Таким образом, целью исследования стал выбор принципа работы системы зажигания для эффективной реализации концепции «бедного горения» в газовых ДВС с учётом условий их эксплуатации.

Факторы, влияющие на процесс воспламенения в газовых ДВС

Для качественной работы на бедной смеси с обеспечением полного её сгорания и высокого индикаторного КПД требуется уменьшение цикловой нестабильности процесса сго-

рания до приемлемого уровня. Последняя величина определяется в первую очередь следующими факторами [11]:

- 1) продолжительностью процесса сгорания (в град. п. к. в), определяемой частотой вращения коленчатого вала и скоростью фронта пламени;
- 2) постоянством начальных условий внутри камеры сгорания на момент зажигания;
- 3) постоянством процесса ввода тепловой энергии в локальные области камеры сгорания для создания и развития первичных очагов пламени.

Рассмотрим указанные факторы более детально.

1. Скорость ламинарного пламени падает при увеличении α и зависит от химического состава газового топлива [9].

2. Стабильность параметров процесса наполнения цилиндра и уровень гомогенизации рабочей смеси определяется в первую очередь конструктивными особенностями ДВС и его регулировками. Для увеличения нижнего предела воспламенения рабочей смеси также можно усиливать турбулизацию смеси [12].

3. Постоянство подвода и распределения тепловой энергии во времени и пространстве в предполагаемом очаге воспламенения зависит от принципа работы технических средств подвода энергии (систем зажигания), а также физико-химических условий топливовоздушной смеси в области формирования очага воспламенения.

Способы улучшения надёжности воспламенения смеси с помощью систем зажигания

Очевидно, существует необходимость объективного выбора критериев оценки системы зажигания для оптимизации её показателей в течение всего жизненного цикла газового двигателя, использующего концепцию «бедного горения».

Исходя из этого обстоятельства, качественная оценка систем зажигания как технических средств для реализации ввода энергии при заданных условиях работы ДВС выполняется по следующим параметрам:

– вероятность создания отдельного первичного очага пламени;

- количество независимых очагов, созданных одновременно и разнесённых в пространстве основной камеры сгорания;
- время наработки элементов системы на отказ до первого ТО;
- себестоимость комплекта системы зажигания для отдельного ДВС;
- надёжность работы системы.

Существует несколько концепций, которые могут обеспечить надёжное воспламенение рабочей смеси в цилиндре газового ДВС, работающего с использованием технологии «бедного горения» (рис. 1) [13]:

- зажигание смеси непосредственно в основной камере сгорания; используется в ДВС со средним и малым диаметром цилиндра ($D \leq 170$ мм) для работы при $1,4 \leq \alpha \leq 1,6$;
- зажигание смеси посредством пассивной форкамеры, используемой в ДВС с большим или средним диаметром цилиндра, для работы при $1,5 \leq \alpha \leq 1,8$;
- зажигание смеси посредством форкамеры, питаемой газовым топливом (активная форкамера), используемой в ДВС с большим диаметром цилиндра ($D \gg 170$ мм), для работы при $1,5 \leq \alpha \leq 2,5$.

Вопросы использования форкамер на газовых ДВС подробно рассмотрены в работе [14]. При выборе конструкции форкамеры необходимо учитывать следующее:

- 1) объём форкамеры нужно выбирать с учётом объёма основной камеры сгорания;
- 2) выходящие потоки пламени не должны попадать на поверхность поршня и перегревать её, расположение сопел форкамеры нужно выбирать с учётом конструкции основной камеры сгорания;
- 3) повышенную опасность калильного зажигания от поверхностей деталей форкамеры.

Наилучшие результаты по работе на обеднённой смеси достигаются при использовании активной форкамеры. На практике подобный принцип реализован на большинстве промышленных газовых двигателей с большим объёмом цилиндра [9], что позволяет ускорить распространение фронта пламени в пространстве основной камеры сгорания.

Компромиссным решением является использование пассивной форкамеры, не требующей внесения существенных конструктивных изменений в головку блока цилиндров (свечи со встроенной форкамерой) [13].

Однако пассивная форкамера не позволяет реализовать расслоение рабочей смеси, а только устраняет её движение в зоне искрового промежутка свечи зажигания.

Несомненно, данный подход может частично улучшить условия воспламенения рабочей смеси, но для полноценной реализации технологии «бедного горения» его недостаточно.

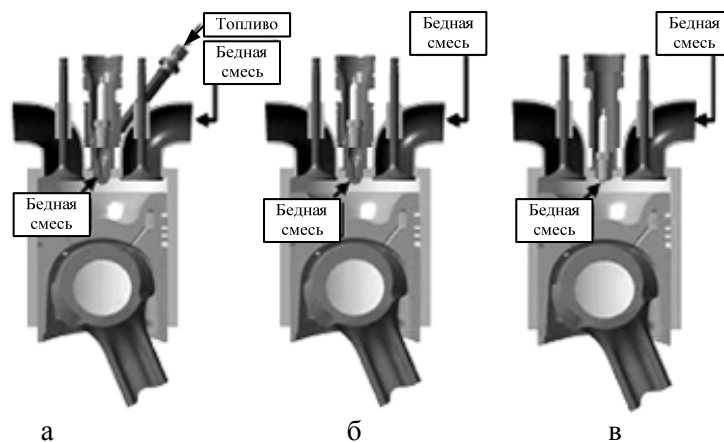


Рис. 1. Концепции зажигания рабочей смеси с использованием «бедного горения»: а) активная форкамера, б) пассивная форкамера, в) зажигание без применения форкамеры

Как представлено на рис. 2, процесс распространения пламени в камере сгорания «ускоряется» созданием множественных независимых пространственно разнесенных в объеме КС первичных очагов пламени, возникающих одновременно [9]. Параллельно с этим существенно увеличивается вероятность воспламенения смеси. Например, такой эффект может быть достигнут за счёт установки в цилиндре ДВС двух и более свеч зажигания.

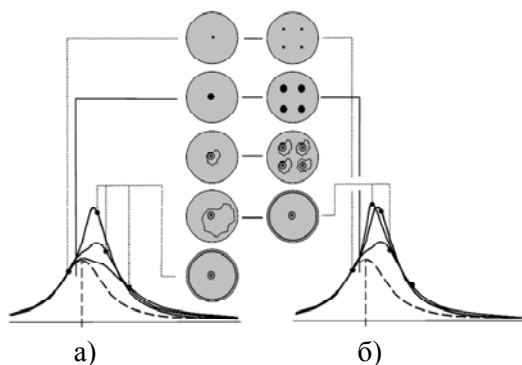


Рис. 2. Развитие фронта пламени при одноточечном (а) и многоточечном (б) зажигании.

Система с многоточечным зажиганием позволяет увеличить вероятность создания отдельного первичного очага пламени за счёт увеличения количества независимых очагов, созданных одновременно и разнесённых в пространстве основной камеры сгорания.

Также одним из способов является добавление в топливо компонентов с низкой энерги-

ей воспламенения, например – водорода [15]. Полученная смесь природного газа и водорода, как правило, называется смесевым топливом [15]. В работе [17] предложено использовать данный подход для водородного двигателя, работающего при $\alpha > 3$. При этом используется серийная искровая система зажигания [17].

Известно, что минимальная энергия зажигания (МЭЗ) в районе нижнего предела воспламенения смеси сильно зависит от химического состава последней [19]. В работе [18] описано влияние энергии разряда на воспламеняемость различных топливовоздушных смесей. В исследовании показано, что увеличение энергии разряда в метано-воздушной смеси с 40 мДж до 8 Дж изменяет нижний предел воспламенения смеси от 4,8 % до 2,7 % метана по объёму [20].

Таким образом, один из эффективных способов нейтрализации данных негативных явлений – улучшение процесса воспламенения смеси за счёт применения высокоэнергетической системы зажигания.

Аналитический обзор систем зажигания для газовых двигателей

Система зажигания является техническим средством подвода энергии в область камеры сгорания и отвечает за распределение вводимой энергии в пространстве и времени. Виды применяемых в газовых ДВС систем зажига-

ния и их основные характеристики приведены в табл. 1 [3–9, 11–14].

Для передачи и распределения энергии в смесь внутри камеры сгорания используются различные физические явления, что определяет разнообразие как перспективных, так и ныне применяемых в эксплуатации систем зажигания для газовых ДВС.

Таким образом, все СЗ можно разделить на три большие группы:

а) электрические искровые СЗ, где каждая из СЗ использует один из участков искрового

разряда (пробой, дуга, тлеющий разряд) для передачи порции энергии в смесь;

б) электрические неискровые СЗ коронного разряда;

в) неэлектрические СЗ.

В работе [3] оценка возможностей физических принципов работы систем зажигания представлена как экспериментальная статистическая характеристика сгорания неподвижной смеси в замкнутом объеме (бомбе) при различных её давлениях и составах (рис. 3–5). Начальная температура смеси была 110°C.

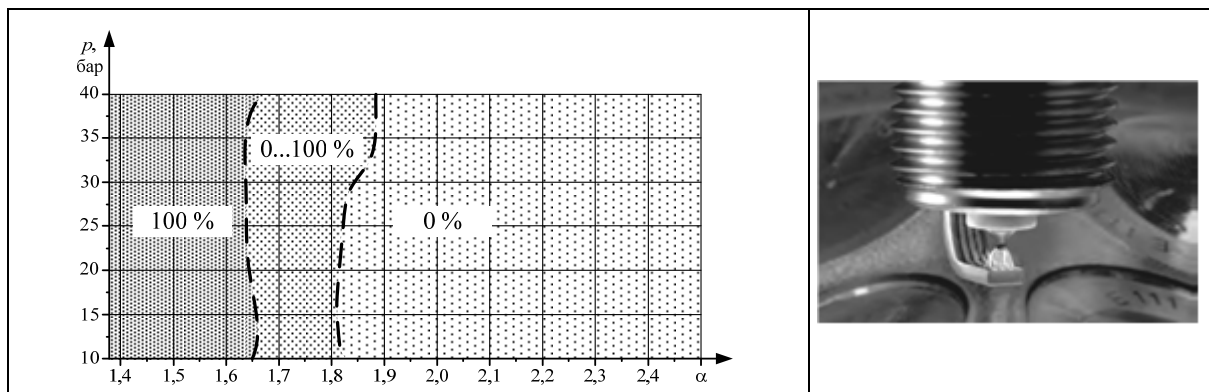


Рис. 3. Вероятность сгорания при воспламенении искровой СЗ тлеющего разряда (СЗ «MORIS», энергия – 120–170 мДж, длит. – 0,5–1 мс, зазор – 1 мм, мощность – до 170 Вт)

Таблица 1 Системы зажигания, применяемые на газовых ДВС, и их характеристики

Формы передачи энергии		Принцип работы		Форкамера		Необх. констр. измен.	Давл. в КС при зажигании, МПа	Параметры процесса подвода и распределения энергии						Эрозия электродов за рабочий цикл, 10 ⁻¹² г
								Теплоподвод в смесь ¹ , %	Энергия, мДж	Мощн., Вт	Длительн., мс	Область ввода энергии, мм	Кол-во очагов восплам.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Электрические	Искровые ²	ID	Многоразрядная СЗ с накоплением энергии в индуктивности (DI-Ignition)	–	–	до 2	10–20	до 100	10–70	1–3	0,3–1	1	300–500	
		CD	Одноискровая СЗ (CD-Ignition)	–	–	до 4	10–20	до 12	10–50	0,2–0,5		–	1	280
	+ ³			–	–	–	–	–	–	–	–	≥4	300	
				+ ⁴	+		–	–	–	–	–	≥4	200	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Электрические	Искровые ²	CD	Короткий мощный дуговой импульс (<i>Plasmastrahl Ignition</i>)	-	-	до 4	до 30	до 15000	\wedge $5 \cdot 10^6$	до 10^{-3}	3-6	1	13300	
			Многоискровая СЗ (<i>Multispark CD-Ignition</i>)	-	-		до 30	до 50	$> 5 \cdot 10^5$	до $3 \cdot 10^{-6}$		1		до 2340
			Универсальная СЗ с регулируемой искрой (<i>long spark CD-Ignition</i>)	-	-		10-20	до 100	10-70	0,2-2		1		300
	AC	Универсальная СЗ с регулируемой искрой (<i>long spark AC-Ignition</i>)	-	-	10-20		до 120	10-70	0,2-3	1	330			
АС-корона		Коронная СЗ переменного тока	-	-	> 10	более 50	до 200	30-70	0,2-2	3-10	4	0		
Не электрические	Лазер	Импульсный наносекундный лазер с однофокусной или многофокусной линзой	-	-	> 10	100	до 20	$10-20 \cdot 10^6$	до $5 \cdot 10^6$	до 0,2	1-3	-	-	
	Калильная	Форсунка впрыскивает газ на поверхность калильной свечи в форкамере	+	+	> 10	-	-	-	-	-	-	-	-	
	ВЧ плазма	Микроволновое излучение ионизирует газозвоздушную смесь и создаёт плазму	-	-	-	до 100	до 3000	20-600	0,2-3	1-3	1	-	-	

Примечания

1. Подведенная энергия превращается в теплоту, часть которой отводится в окружающую смесь и детали КС (как правило, электроды свечи или детали форкамеры) в виде тепловых потерь [16].
2. Потери теплоты в искровых СЗ сильно зависят от параметров электрического разряда, зазора и диаметра электродов свечи зажигания. Здесь приведены результаты для свеч с зазором 0,3-1 мм и диаметром центрального электрода 2,5 мм.
3. Пассивная форкамера. Количество очагов воспламенения условно принимается равным количеству сопел форкамеры.
4. Активная форкамера. Количество очагов воспламенения условно принимается равным количеству сопел форкамеры.

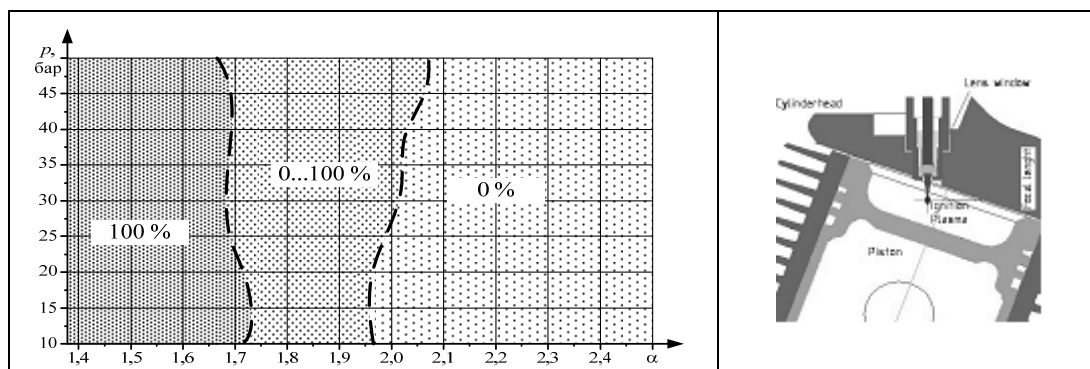


Рис. 4. Вероятность сгорания при воспламенении лазерной однофокусной СЗ (энергия – 20 мДж, длительность – 5 мс, диаметр очага пламени – 50 мкм, мощность – до 4 МВт)

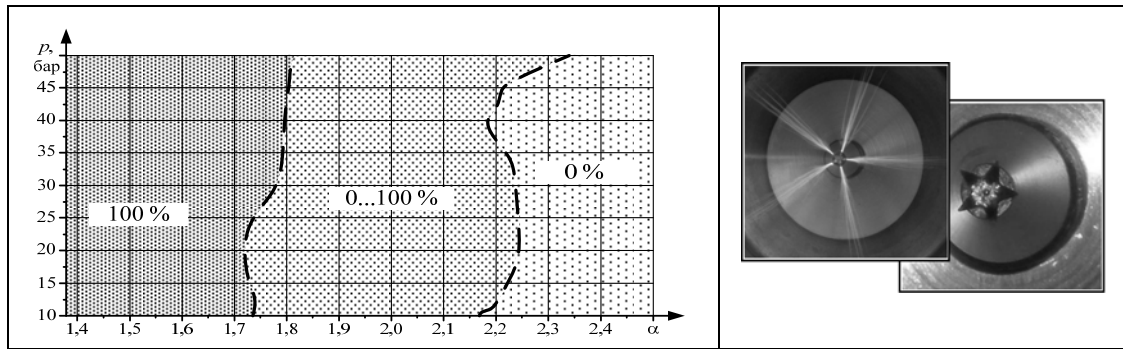


Рис. 5. Вероятность сгорания при воспламенении СЗ коронного разряда (энергия – 22000 мДж, длительность – 3 мс, длина разряда – более 10 мм, мощность – до 7 кВт)

Как видно из рис. 3–5, наблюдается увеличение вероятности возникновения циклов полного сгорания:

- с увеличением количества вводимой энергии;
- с увеличением плотности вводимой энергии;
- с увеличением пиковой мощности подвода энергии;
- с увеличением количества независимых очагов подвода энергии.

На основании выполненной оценки можно сделать следующие выводы относительно возможностей использования физических принципов в системах зажигания газовых ДВС.

1. Любой процесс зажигания в газовом ДВС характеризуется распределением энергии в пространстве и времени внутри камеры сгорания, что имеет непосредственное влияние на формирование первичного очага пламени.
2. Процессу ввода энергии сопутствует потеря теплоты в окружающую смесь и детали КС, что негативно влияет на эффективность воспламенения очага топливовоздушной смеси.
3. При достижении некоторой минимальной энергии зажигания (МЭЗ), передаваемой газозвушной смеси, процесс воспламенения зависит главным образом от химического состава и давления смеси.
4. Дальнейшее увеличение энергии зажигания и/или изменение формы ее подвода с целью увеличения плотности вводимой энергии ведет к улучшению вероятности создания первичного очага пламени, что приводит к расширению области частичного сгорания.
5. Для эффективной эксплуатации газового ДВС с использованием «бедного горения» необходимо значительное улучшение вероят-

ности сгорания до достижения приемлемого уровня цикловой нестабильности, что может достигаться увеличением количества вводимой энергии, изменением способа ее подвода и созданием нескольких очагов пламени.

Согласно приведенным критериям качественной оценки систем зажигания как технических средств для реализации подвода энергии при заданных условиях работы ДВС СЗ были сведены в табл. 2, где расположены по степени соответствия данным критериям в порядке убывания [3–9, 11–14].

Анализ информации, приведенной в табл. 2, демонстрирует, что наилучшими СЗ для газовых ДВС, работающих с использованием концепции «бедного горения», являются следующие системы:

- система зажигания коронного разряда;
- лазерная система зажигания;
- универсальная конденсаторная система зажигания с повышенной длительностью тлеющего искрового разряда (*Direct Energy Ignition System – DEIS*).

Лазерная система зажигания может применяться в газовых ДВС всех типов, однако данная технология находится в стадии разработки в связи с чувствительностью оптической системы к вибрациям [4].

Система зажигания коронного разряда находится на более высоком этапе технической проработанности, однако в серийном производстве её ещё нет. Кроме того, она не подходит для ДВС с диаметром цилиндра более 170 мм, часто использующих форкамерное зажигание [13, 14].

В искровых СЗ имеет место потеря теплоты в электроды свечи зажигания [16], что компенсируется большей энергией искрового разряда.

Таблица 2 Перспективные технологии зажигания для газовых ДВС

Вид СЗ	Давл. в КС на момент зажигания, МПа	Теплоотвод в смесь, мДж	Параметры импульса				Нижний предел воспламенения по α	Минимальный диаметр цилиндра, мм	Эрозия электродов за рабочий цикл, 10^{-12} г	Реализация на станд. компонентах	Готовность к эксплуатации	Возможность использования форкамеры	Возможн. диагностики пропусков вспышек
			Энергия, мДж	Мощность, Вт	Длина, мм	Длительность, мс							
<i>CD-Ignition</i> с активной форкамерой	до 4	-	-	-	-	-	2,5	> 170	300	+	+	+	+
Лазерная СЗ	> 10	20	20	$2 \cdot 10^7$	0,05	10^{-6}	2,0	-	-	-	-	+	-
Коронная СЗ	> 10	200	200	70	до 10	3	2,0	до 170	0	-	-	-	-
<i>Long spark AC-Ignition</i>	до 4	< 24	120	70	0,3-1	3	1,8	до 170	350	+	+	+	+
<i>Long spark CD-Ignition</i>	до 4	< 20	100	70		до 2	1,8	до 170	300	+	+	+	+
<i>CD-Ignition</i> с пассивной форкамерой	до 4	-	-	-		-	1,8	до 170	> 300	+	+	+	+
Классическая <i>CD-Ignition</i>	до 4	< 4	20	50		0,5	1,6	до 170	300	+	+	+	+
Многоразрядная <i>DI-Ignition</i>	до 2	< 10	50	70		3	1,4	до 170	300	+	+	+	+

В современных условиях наилучшим выходом является использование искровой *DEIS*-системы [7, 13]. Такая система не только перекрывает все типы газовых ДВС, но и базируется на компонентах, массовое производство которых давно отлажено. Кроме того, блок управления *DEIS* позволяет реализовать практически любые параметры искрового разряда. В отличие от других систем, в *DEIS*-системе существует возможность реализовать адаптивное управление с использованием интегрированной диагностики пропусков вспышек, повысив, таким образом, надёжность и безопасность работы силовой установки.

С учётом вышесказанного, в настоящее время *DEIS*-система является наилучшим вариантом использования в газовых ДВС.

Как видно из рис. 6 и 7 [21], технология *DEIS* позволяет существенно снизить коэффици-

ент цикловой нестабильности в сравнении с классической конденсаторной одноискровой системой зажигания (*Capacitive Discharge Ignition – CDI*), что позволяет эффективно реализовать концепцию «бедного горения» при условии, что значение α будет больше.

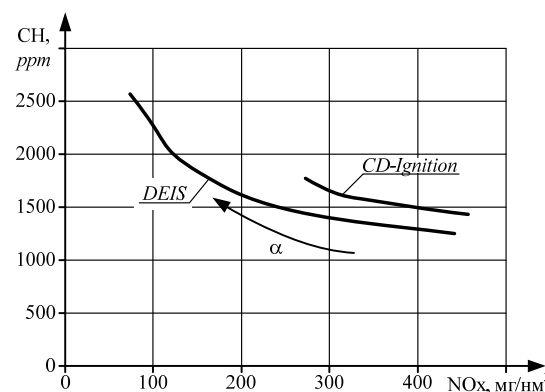


Рис. 6. Сравнение показателей токсичности для *CDI*- и *DEIS*-систем

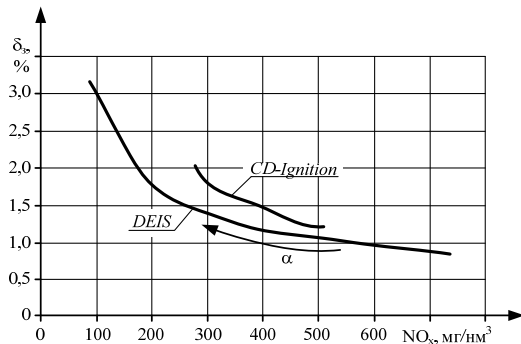


Рис. 7. Сравнение коэффициентов цикловой нестабильности для CDI- и DEIS-систем

Работа при больших значениях α приводит к снижению выбросов NO_x (рис. 7), а снижение доли пропусков вспышек – к уменьшению выбросов CH (рис. 6).

Выводы

1. Процесс зажигания в газовом ДВС характеризуется распределением вводимой энергии в пространстве и времени внутри камеры сгорания, что оказывает непосредственное влияние на формирование первичного очага пламени. Система зажигания является техническим средством подвода энергии.
2. Оптимальным путём улучшения условий воспламенения рабочей смеси в газовом двигателе, работающем с использованием концепции «бедного горения», является увеличение количества и плотности энергии, подводимой в рабочую смесь системой зажигания.
3. Для решения задач надёжного воспламенения смеси и обеспечения высоких эксплуатационных характеристик газовых ДВС всех типов в условиях «бедного горения» целесообразно использовать универсальную конденсаторную систему зажигания с повышенной длительностью искрового разряда (DEIS).
4. Так как увеличение количества искр и их энергетических показателей в искровых СЗ ведёт к снижению ресурса свечей зажигания, то для каждого режима работы ДВС параметры искрового разряда должны задаваться индивидуально с возможностью реализации адаптивного управления искровым разрядом.
5. Для повышения надёжности и безопасности работы газового ДВС необходимо ис-

пользование диагностики пропусков вспышек, реализуемой непосредственно системой зажигания.

Литература

1. Экспериментальная установка для доводки систем зажигания и управления газовым двигателем с искровым зажиганием 6Ч 13/14 / В. А. Богомолов, Ф. И. Абрамчук, В. М. Манойло и др. // Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. – 2005. – № 4 (22). – С. 42–45.
2. Абрамчук Ф. И. Реализация возможностей сжатого природного газа при использовании его в качестве топлива для ДВС / Ф. И. Абрамчук, А. Н. Кабанов, С. В. Салдаев // Автомобильный транспорт. – 2005. – № 17. – С. 61–66.
3. Kofler H. Corona and Laser Ignition in Internal Combustion Engines. A comparison to conventional spark plug ignition: master thesis. / H. Kofler. – Wien Institut fur Photonik, 2007. – 92 p.
4. Stotz P. Konstruktion Laserzündkerze mit Verifizierung am Motor / P. Stotz // Automobiltechnik. – 2006. – № 1. – P. 24.
5. Burrows J. Corona ignition system for highly efficient gasoline engines / J. Burrows, J. Lykowski, K. Mixell // MTZ. – 2013. – № 74. – P. 38–41.
6. Брукс Кейт С. Революционная технология от компании Altronic LLC / Кейт С. Брукс // Турбины и дизели. – 2010. – № 6. – С. 8–12.
7. CPU-XL VariSpark advanced digital ignition system for large gas engines: technical Paper. – Girard, USA, 2011. – 8 p.
8. Kosanovic D. Advanced ECO-FIRE Single Coil Capacitive Discharge Distributor Ignition System: Technology Review / D. Kosanovic. – Arlington, USA: Center for Energy Efficiency and Renewable Energy, University of Massachusetts, 2001. – 8 p.
9. Herdin G. Grundlagen Gasmotoren / G. Herdin. – 2012. – 56 p.
Source: http://www.prof-ges.com/lectures/Gasmotoren_Script_20120418.pdf
10. Абрамчук Ф. И. Влияние добавки водорода к природному газу на свойства смешанного топлива / Ф. И. Абрамчук, А. Н. Кабанов, Г. В. Майстренко // Автомобильный транспорт. – 2009. – № 24. – С. 45–49.
11. Buschbeck M. Laseroptische Analyse der zyklischen Schwankungen in einem Trans-

- parentmotor: PhD thesis / M. Buschbeck. – Technischen Universität Darmstadt, 2013. – 132 p.
12. Das A. Development of a natural gas spark ignition engine for optimum performance / A. Das, H. C. Watson // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – 1997. – Vol. 211, № 5. – P. 361–378.
 13. Herdin G. Gas Engines / G. Herdin: Proceedings of Gas Engine Workshop (22.03.2012) / Heinzmann G. – Schönau, Germany: Heinzmann, 2012. – 112 p.
 14. Herdin G. Wirkungsgradpotenziale bei der ungespülten Vorkammer: Tagung «Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors» (24–25.09.2013) / G. Herdin. – Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz. – 2013. – P. 110–126.
 15. Saggau. B. Kalorimetrie der drei Entladungsformen des elektrischen Zündfunken / B. Saggau // Archiv für Elektronik. – 1981. – Vol. 64. – P. 229–235.
 16. Hamori F. Hydrogen Assisted Jet Ignition for the Hydrogen Fuelled SI Engine / F. Hamori, H. Watson: Proceedings of Conference WHEC 16 (Lyon, France, 13–16 June 2006). – Lyon: WHEC, 2006. – P. 1–11.
 17. Flammability Limits, Ignition Energy and Flame Speeds in H₂-CH₄-NH₃-N₂O-O₂-N₂ Mixtures: Report / U. J. Pfahl, M. C. Ross, J. E. Shepherd and oth. – USA: Caltech, 2000. – 48 p.
 18. Kuchta J. M. Investigation of fire and explosion accidents in the chemical, mining, and fuel-related industries: manual / J. M. Kuchta. – Bulletin 680: U.S. Bureau of Mines, 1985. – 20 p.
 19. Zabetakis M. G. Flammability characteristics of combustible gases and vapors / M. G. Zabetakis. – Bulletin 627: U.S. Bureau of Mines, 1965. – 24 p.
 20. Gas/Electric Partnership. New Gas Engine Ignition Technologies from Altronic: Proceedings of Gas/Electric Workshop (6.02.2013, Houston, Texas, USA). – Houston: Gas/Electric Ventures, 2013. – P. 2–12.
- Рецензент: А. Н. Пойда, профессор, д. т. н., ХНАДУ.
- Статья поступила в редакцию 4 марта 2014 г.
-