



ФЕДИН Константин Иванович -
кандидат технических наук,
генеральный директор ООО «Энергогазтехнология»
Адрес: 123557, г. Москва, ул. Пресненский вал, 21
e-mail: engt@engt.ru

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ГАЗОВЫХ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСКРОВЫМ ЗАЖИГАНИЕМ

В настоящее время применяется два варианта газовых двигателей с искровым зажиганием. С **форкамерно-факельным зажиганием**, где в специальную форкамеру подается богатая газо-воздушная смесь, которая воспламеняется от свечи зажигания, воспламеняя основную обедненную газо-воздушную смесь в цилиндре двигателя. Данный вариант реализуется на двигателях большой мощности, в основном от 2-х МВт, из-за сложности топливной системы и, соответственно, ее высокой стоимости.

Существует вариант, когда в форкамеру подается богатая водородно-воздушная смесь, которая после воспламенения свечей зажигания воспламеняет основную обедненную газо-воздушную смесь в цилиндре двигателя. Данный вариант значительно эффективнее, но и значительно сложнее в исполнении, т.к. необходимо иметь второе топливо - водород. Поэтому вариант не нашел практического применения.

В подавляющем большинстве случаев применяются газовые двигатели с искровым зажиганием и **установкой свечи в цилиндр при внешнем смесеобразовании**, когда в цилиндр подается готовая газо-воздушная смесь через впускной коллектор.

В двигателях без наддува степень сжатия снижается до 12-14 в зависимости от размерности и используется стехиометрическая газо-воздушная смесь, чтобы компенсировать потерю мощности от снижения степени сжатия. Эффективный КПД таких двигателей снижается до 35%, при этом значительно возрастает их теплонпряженность, что требует специальных дорогостоящих мер для сохранения работоспособности и моторесурса.

В двигателях с турбонаддувом используется газо-воздушная смесь с коэффициентом избытка воздуха 1,4-1,5, а степень сжатия снижается до 10-12 в зависимости от размерности и степени повышения давления в турбокомпрессоре. Эффективный КПД таких двигателей может достигать 37% и выше. При этом теплонпряженность их значительна, т.к. исключается продувка камеры сгорания и требуются специальные дорогостоящие меры для сохранения работоспособности и моторесурса двигателя.

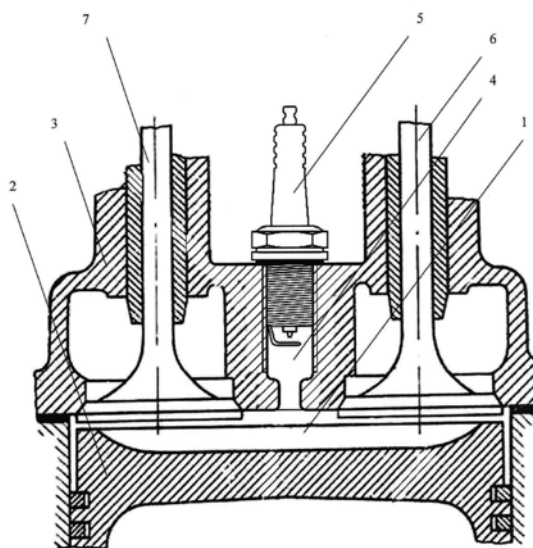


Рис. 1. Разрез поршневого газового двигателя с искровым зажиганием

Использование предлагаемой технологии повышает надежность, эффективные и экологические показатели газовых поршневых двигателей с искровым зажиганием.

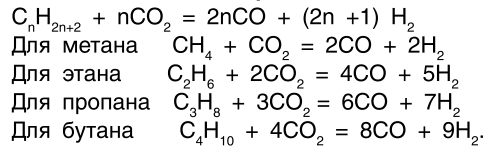
На рис. 1 представлен разрез газового поршневого двигателя с искровым зажиганием.

Двигатель имеет камеру сгорания 1 (цилиндр), ограниченную поршнем 2 и головкой цилиндра 3, камеру зажигания 4, соединенную каналом с камерой сгорания 1. В камере зажигания 4, изготовленной из никелевой жаропрочной стали, установлена свеча зажигания 5. Газообмен двигателя осуществляется через выпускной клапан 6 и впускной клапан 7.

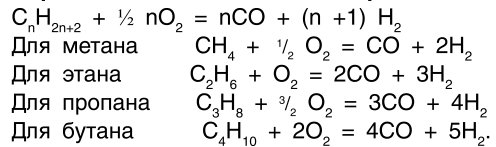
Рабочий процесс газового поршневого двигателя с искровым зажиганием организован следующим образом (заявка № 2010146555/06(067211) от 16.11.2010 г.). На такте наполнения обедненная газо-воздушная смесь с коэффициентом избытка воздуха 1,5-1,8 поступает через впускной клапан 7 в цилиндр двигателя, при этом в камере зажигания 4 и канале, соединяющем ее с камерой сгорания 1, сохраняются остаточные газы (исходя из конструкции нет ее продувки) температурой 600° С, в составе которых по объему содержится 7% углекислого газа, 6,5% кислорода, 13% водяного пара, при коэффициенте избытка воздуха 1,5 [1]. В процессе сжатия в камеру зажигания, температура которой 400° С, поступает газо-воздушная смесь, температура и давление которой возрастает до 550° С и 5,5 МПа к моменту искробразования в камере зажигания (энергия разряда не менее 200 мДж). Перечисленные факторы запускают в

камере зажигания реакцию комбинированной конверсии низших алканов (метан, этан, пропан, бутан) в водород и окись углерода. Камера зажигания изготовлена из никелевой жаропрочной стали и является катализатором реакции комбинированной конверсии [2, 3].

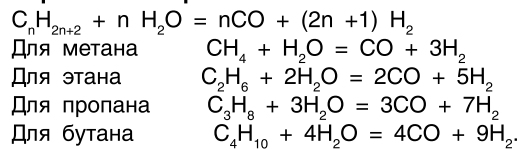
Углекислотная конверсия



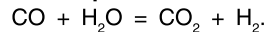
Парциальное окисление кислородом



Паровая конверсия



Параллельно идет паровая конверсия окиси углерода в водород



Температура начала конверсии для: метана $CH_4 \sim 400^\circ C$, этана $C_2H_6 \sim 300^\circ C$, пропана C_3H_8 и бутана $C_4H_{10} \sim 200^\circ C$.

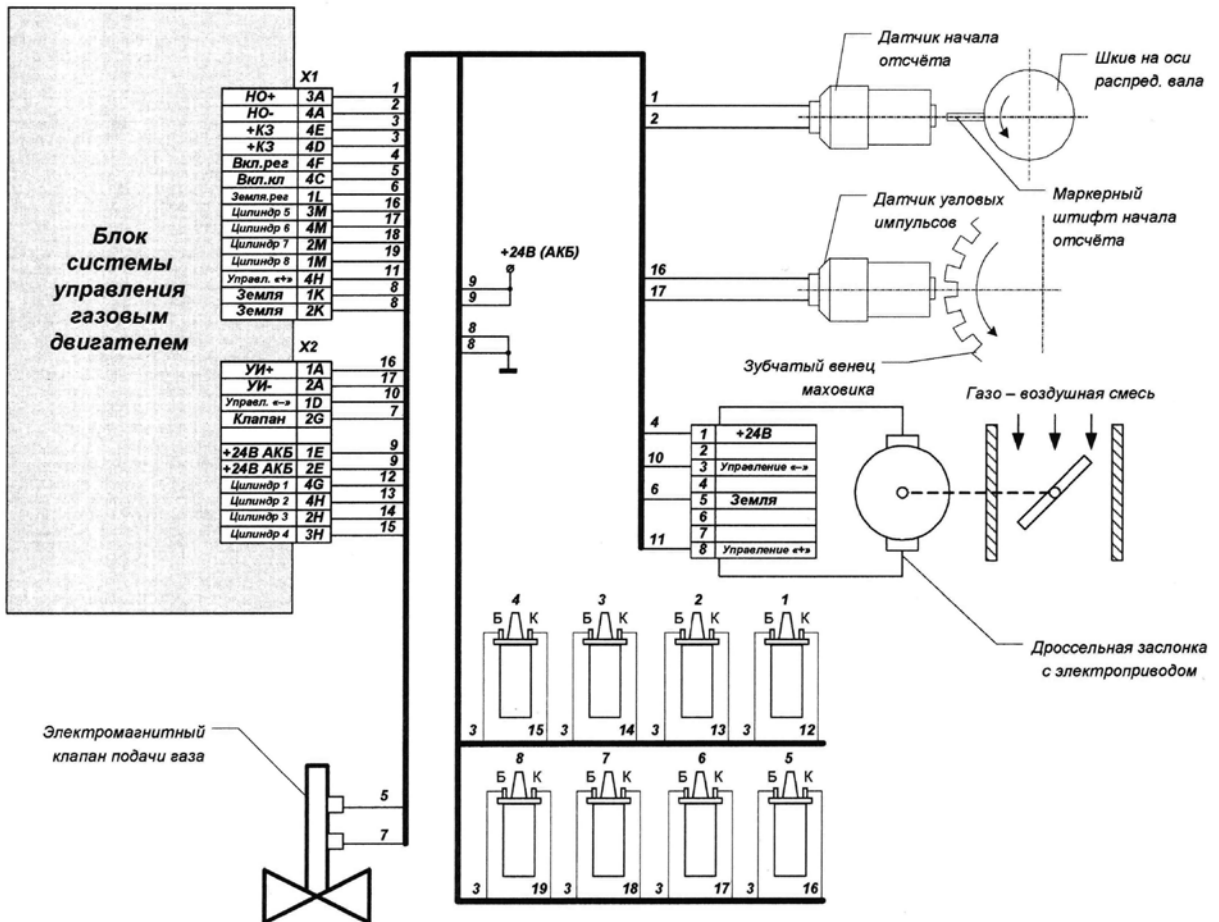


Рис. 2. Структурная схема системы управления и разводка кабеля

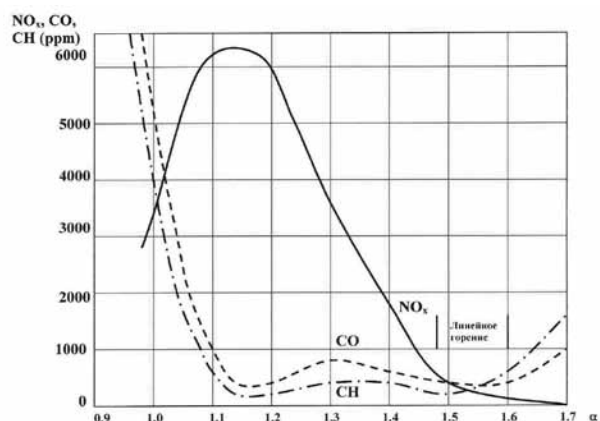


Рис. 3. Зависимость токсичности выхлопных газов газового двигателя с искровым зажиганием от коэффициента избытка воздуха

Водород за счет своего минимального веса скапливается в камере зажигания 4 в районе свечи зажигания 5, в канале, соединяющем камеру зажигания 4 с камерой сгорания 1, и послойно у выхода из канала. К моменту искрообразования достаточное количество водорода сосредоточено в нужном месте.

Водород имеет очень широкие концентрационные пределы воспламенения по объему в воздухе от 4,09% до 80%, впрочем, как и окись углерода от 12,5% до 80%, в отличие от метана от 5,28% до 15,4%. Водород имеет более высокий коэффициент диффузии 0,66 см²/с в отличие от метана 0,196 см²/с. Для воспламенения водорода необходимо меньше энергии приблизительно в 17 раз. Минимальная энергия воспламенения водорода 0,019 мДж, метана 0,33 мДж [4].

Вышеизложенное дает возможность воспламенить водород при искрообразовании в свече зажигания 5 с

Таблица 1

Токсичность выхлопных газов в диапазоне для вновь изготовленных двигателей и двигателей после капитального ремонта

	Токсичность отработавших газов (г/кВт*ч)			Расход топлива кДж/кВт*ч	Стоимость топлива, руб./тонна
	Оксиды азота NO _x	Оксид углерода CO	Углеводороды CH		
Дизель ЯМЗ-238М2	9 - 11	7 - 9	1,5 - 4	10 200	20 000
Газовый двигатель на базе ЯМЗ-238М2	2,39 - 3,84	3,11 - 4,99	0,79 - 1,15	9 800	7 000
Газовый двигатель на базе ЯМЗ-238М2 с катализатором	1,2 - 1,92	1,53 - 2,46	0,34 - 0,54	9 900	7 000

Таблица 2

Нагрузочная характеристика при 1500 мин⁻¹ ЯМЗ-238М2 (8Ч 13/14) Дизель. Степень сжатия 16,5. Эффективный КПД 39%

	xx, 0 кВт	25%, 25 кВт	50% 50 кВт	75% 75 кВт	100% 100 кВт
коэффициент избытка воздуха	7,7	5	4,8	3	2
температура выхлопных газов °С	130	183	196	290	420

Таблица 3

Нагрузочная характеристика при 1500 мин⁻¹ ЯМЗ-238М2 (8Ч 13/14) Газовый двигатель по традиционной технологии. Степень сжатия 12,5. Эффективный КПД 35%

	xx, 0 кВт	25%, 25 кВт	50% 50 кВт	75% 75 кВт	100% 100 кВт
коэффициент избытка воздуха	1,5	1,45	1,43	1,4	1,38
температура выхлопных газов °С	450	525	530	550	570

Таблица 4

Нагрузочная характеристика при 1500 мин⁻¹ ЯМЗ-238М2 (8Ч 13/14) Газовый двигатель по технологии заявка № 2010146555/06(067211) от 16.11.2010 г. Степень сжатия 16,5. Эффективный КПД 41%

	xx, 0 кВт	25%, 25 кВт	50% 50 кВт	75% 75 кВт	100% 100 кВт
коэффициент избытка воздуха	1,72	1,64	1,56	1,53	1,6
температура выхлопных газов °С	410	425	430	435	440

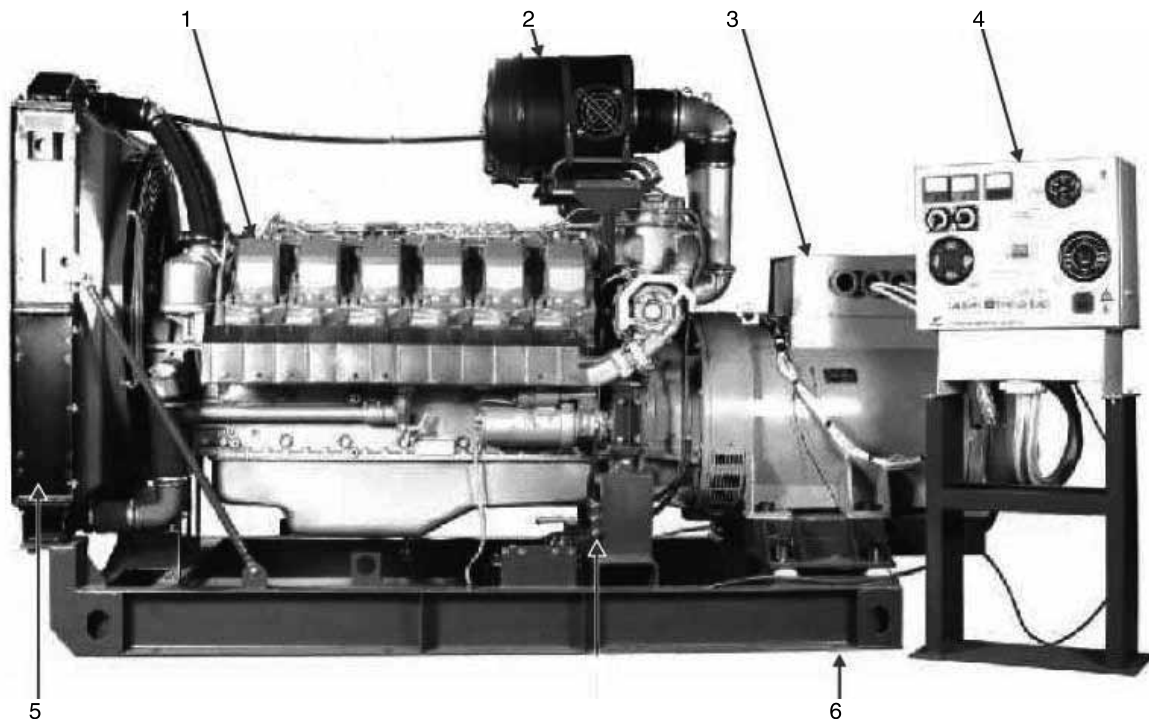


Рис. 4. Общий вид электроагрегата:
 1 - двигатель ЯМЗ-8503.10; 2 - воздушные фильтры; 3 - генератор силовой;
 4 - шкаф управления; 5 - рама; 6 - радиатор водяной.

минимальными затратами энергии. Далее горячий водород (окись углерода) выходит в камеру сгорания 1, зажигая широким фронтом основную бедную газо-

воздушную смесь, обеспечивая устойчивую работу двигателя без детонации с высокой степенью сжатия во всем необходимом диапазоне частот вращения, нагру-

Таблица 5

Технические характеристики

Мощность, кВт	60	100	150	200	300
Степень автоматизации	1-ая или 2-ая				
Габаритные размеры, мм	2160x1020x1500	2510x1020x1500	2750x1320x1500	3000x1400x1800	3800x1400x1850
Номинальная частота вращения	1500 мин ⁻¹				
Коэффициент мощности	0,8				
Род тока	Переменный, трехфазный				
Частота тока, Гц	50				
Номинальное напряжение, В	400				
Ток номинальный, А	108	180	270	360	540
Тип двигателя	ЯМЗ-236М2	ЯМЗ-238М2	ЯМЗ-238Д	ЯМЗ-7514	ЯМЗ-8503.10
Система охлаждения	Радиаторная				
Вид топлива	Природный, попутный нефтяной газ и пр.				
Расход топлива при номинальной мощности, нм ³ /ч	18	30	42	55	84
Назначенный ресурс до ремонта	15000	15000	12000	12000	12000
Масса, кг	1700	2050	2600	3460	4000
Диапазон рабочих температур, °С	+5...+50				
Генератор	Leroy Sommer, ГС 60	Leroy Sommer, ГС 100	Leroy Sommer, ГС 150	Leroy Sommer, ГС 200	Leroy Sommer, ГС 300

зок и при переходных режимах работы. При этом повышается надежность, эффективные и экологические показатели двигателя.

Конфигурация и объем камеры зажигания 4 и соединительного канала с камерой сгорания 1 определяется с использованием разработанной математической модели и уточняется экспериментально для оптимизации рабочего процесса двигателя. При этом нет необходимости контролировать концентрацию водорода-воздушной смеси в камере зажигания 4. Объем камеры зажигания 4 совместно с соединительным каналом составляет 3-10% объема камеры сгорания 1 и зависит от конструкции, размерности, быстроходности двигателя и ряда прочих менее важных параметров.

Для реализации технологии перевода на газовое топливо дизельных двигателей была разработана микропроцессорная система управления газовым двигателем, предназначенная для управления зажиганием, подачи топлива и автоматического регулирования частоты вращения. Система обеспечивает устойчивое искрообразование при высоких давлениях сжатия при степени сжатия дизельных двигателей (энергия разряда не менее 200 МДж). Структурная схема системы управления представлена на **рис. 2**.

С использованием данного изобретения была проведена конвертация для работы на природном газе ряда дизельных двигателей, и были получены следующие результаты.

Газовый поршневой двигатель с искровым зажиганием устойчиво работает без детонации со степенью сжатия дизельного двигателя во всем диапазоне частот вращения, нагрузок и при переходных режимах, с коэффициентом избытка воздуха от 1,5 до 1,8.

Эффективный коэффициент полезного действия (КПД) газового поршневого двигателя с искровым зажиганием выше 40%.

Экологические показатели - минимально возможные без применения катализаторов (см. **рис. 3**).

Температура выпускных газов в пределах 400° С, что значительно повышает надежность газовых поршневых двигателей с искровым зажиганием.

Во всех случаях камера зажигания вместе с соединительным каналом хорошо вписывается на место форсунки серийных дизельных двигателей, что значительно упрощает их конвертацию для работы на газовом топливе, особенно без изменения степени сжатия.

Экспериментальные данные по наиболее широко применяющемуся в России двигателю ЯМЗ-238М2 представлены в **таблицах 1-4**.

На базе двигателей ОАО «Автодизель» (Ярославский моторный завод) были разработаны электроагрегаты и электростанции с газовыми поршневыми двигателями с искровым зажиганием мощностью 60, 100, 150, 200, 300 кВт. Общий вид электроагрегата мощностью 300 кВт представлен на **рис. 4**, технические характеристики - в **таблице 5**.

По желанию заказчика возможна комплектация электроагрегата оборудованием для утилизации теплоты отработавших газов, охлаждающей жидкости и смазочного масла в варианте мини-ТЭЦ. Количество снимаемой теплоты в виде горячей воды соответствует мощности электроагрегата и нагрузки на него.

В настоящее время данные изделия нашли применение и успешно эксплуатируются на малых предприятиях и в малых газовых котельных в качестве основных и резервных источников питания при снижении стоимости электроэнергии в 3-4 раза в зависимости от региона.

Литература:

1. Дьяченко В.Г. Теория двигателей внутреннего сгорания. - Харьков: Издательский центр НТУ «ХПИ», 2009. - 486 с.
2. Крылов О.В. Углекислотная конверсия метана в синтез-газ // Ж. Российского хим. общества им. Д.И. Менделеева. - М., 2000. - Т. XLIV. - № 1. - С. 19-33.

3. Усачев Н.Я. Окислительная переработка низших алканов: состояние и перспективы/ Н.Я. Усачев, В.В. Харламов, Е.П. Беланова, Т.С. Старостина, И.М. Круковский / Российский химический журнал (ЖРХО им. Д.И. Менделеева). - 2008. - Т. 52. - № 4. - С. 22-31.
4. Гайнуллин Ф.Г. Природный газ как моторное топливо на транспорте / Ф.Г. Гайнуллин, А.И. Грищенко, Ю.Н. Васильев, Л.С. Золотаревский. - М.: Недра, 1986. - 255 с.

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ КОММЕНТАРИЙ К СТАТЬЕ

Результаты расчетов стоимости электроэнергии, вырабатываемой электроагрегатом с газовым поршневым двигателем и дизелем на 100 кВт мощности с глубокой коагенерацией (для Московского региона, по данным 2009 года)

- Средняя стоимость электроэнергии в Московском регионе 3,0 руб./кВт*ч.

- Стоимость электроэнергии, вырабатываемой дизельным электроагрегатом, мощностью 100 кВт - 5,03 руб./кВт*ч.

- Стоимость электроэнергии, вырабатываемой газовым электроагрегатом, мощностью 100 кВт - 1,15 руб./кВт*ч.

Глубокая коагенерация позволяет снимать теплоту с охлаждающей жидкости, смазочного масла, надувочного воздуха и выпускных газов в количестве 120 кВт на каждые 100 кВт электрической мощности в виде нагрева воды.

Отпускные цены нагрева воды в Московском регионе составляют 1,44 руб./кВт*ч.

При годовой наработке 6 000 часов дизельный и газовый электроагрегаты позволяют нагреть горячую воду на сумму:

$$C_{г.в.} = 6\ 000 * 120 * 1,44 = 1\ 036\ 800 \text{ руб.}$$

При расчете стоимости электроэнергии, вырабатываемой электроагрегатом большей мощности, его стоимость увеличивается в среднем на 60% на каждые 100 кВт. Затраты на эксплуатацию возрастают на 10% на каждые 100 кВт. Остальные затраты возрастают пропорционально увеличению мощности. Количество горячей воды, нагретой за счет коагенерации, также возрастает пропорционально мощности.