

## Топливо и энергетика

УДК 621.43:662.7

**Марченко А.П.** докт. техн. наук, **Осетров А.А.**, канд. техн. наук,  
**Кравченко С.С.**, аспирант, **Хамза О.А.**, аспирант

**Национальный технический университет «ХПИ», Харьков**  
ул. Фрунзе, 21, 61002 Харьков, Украина, e-mail: dvs@kpi.kharkov.ua

### Моторные свойства низкокалорийных газовых топлив и их влияние на показатели двигателей внутреннего сгорания

Выполнен анализ возможности использования низкокалорийных газовых топлив (НГТ) в двигателях 11ГД100М с форкамерно-факельным зажиганием и качественным регулированием мощности. Проанализированы свойства НГТ и их влияние на показатели рабочих процессов двигателя. Показано, что двигатели с форкамерно-факельным зажиганием менее чувствительны к изменению компонентного состава топлива и более приспособлены к сжиганию обедненных смесей НГТ с воздухом. Выполнено расчетное исследование рабочего процесса двигателя 11ГД100М при его работе на НГТ. Показано, что использование всех видов НГТ приводит к увеличению объемного расхода топлива двигателем. При этом более высокие индикаторные показатели двигателя достигаются при использовании пиролизного, коксового и генераторного газов. Выполнен анализ способа обогащения состава топливно-воздушной смеси в качестве эффективного мероприятия по улучшению показателей двигателя при работе на НГТ. *Библ. 18, рис. 3, табл. 1.*

**Ключевые слова:** газовый двигатель, форкамерно-факельное зажигание, низкокалорийные газовые топлива, показатели двигателя.

#### Введение

Украина существенно зависит от импорта природного газа и нефти. Постоянный рост тарифов на традиционные энергоносители побуждает к поиску и реализации способов экономии этих энергоресурсов, повышению КПД энергоустановок, использованию альтернативных топлив. Одновременно все большей проблемой для Украины становится утилизация отходов промышленного и сельскохозяйственного производства. Большое количество топливного потенциа-

ла в виде низкокалорийных газов (шахтный, коксовый, доменный, биогаз, газы свалок и т.п.) выбрасывается в окружающую среду и загрязняет атмосферу.

Одним из путей решения указанных проблем является использование низкокалорийных газовых топлив (НГТ) в стационарных энергоустановках с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Эти топлива отличаются от традиционных физико-химическими свойствами. В результате изменяется протекание процессов в цилиндре двигателя, ухудшаются его показате-

ли, а в некоторых случаях становится невозможной работа двигателя.

Анализ конструкций и работы современных газовых двигателей показал, что сравнительно высокую топливную экономичность имеют стационарные газовые двигатели 11ГД100М отечественного производства. В этих двигателях реализовано форкамерно-факельное зажигание топливно-воздушных смесей и качественное регулирование мощности. Благодаря высокой энергии форкамерного факела в двигателях 11ГД100М происходит надежное и эффективное зажигание обедненных и сверхобедненных топливно-воздушных смесей. Это позволяет конвертировать указанные двигатели для использования газов с низкой теплотворной способностью.

Для обеспечения возможности работы двигателей на НГТ и улучшения показателей в их конструкции и регулировку необходимо вносить изменения. До сих пор нерешенными остаются вопросы влияния физико-химических свойств НГТ на рабочие процессы и показатели двигателей 11ГД100М, а также обоснования выбора НГТ с наилучшими моторными свойствами, разработки мероприятий по конвертации указанных двигателей для использования НГТ, оптимизации конструктивных и регулировочных параметров двигателей и др.

Цель работы — исследование моторных свойств НГТ, их влияния на рабочий процесс и показатели двигателей 11ГД100М.

Анализ литературы [1–9] показывает, что НГТ могут быть эффективно использованы в ДВС. Первые двигатели внутреннего сгорания были газовыми и работали на светильном газе, полученном газификацией древесины. С 1940-х гг. промышленно выпускались двигатели, которые использовали в качестве топлива генераторный газ и синтез-газ из древесины и угля [10]. В настоящее время широкими исследованиями двигателей, работающих на различных НГТ, занимаются ведущие моторостроительные корпорации, в частности, компании General Electric, Caterpillar и др. [6, 8, 9].

Основными проблемами использования НГТ в качестве топлив для ДВС является их низкая теплотворная способность, детонационная стойкость, присутствие компонентов, негативно влияющих на процесс сгорания и сроки эксплуатации ДВС, нестабильность компонентного состава [3]. Указанные проблемы в некоторых случаях могут быть устранены адаптацией конструкции двигателя к использованию определенного вида топлива, в частности, изменением степени сжатия, увеличением цикловой

подачи топлива, коррекцией угла опережения зажигания, увеличением энергии зажигания и т.д. [1, 3, 6].

При использовании НГТ в традиционных двигателях с искровым зажиганием, работающих на стехиометрической или обогащенной топливно-воздушной смеси, происходит снижение мощности и КПД двигателя, возникают проблемы с запуском и пропусками воспламенения [2, 11]. Причиной этого является содержание в НГТ инертных компонентов, особенно  $\text{CO}_2$ , что приводит к снижению теплоты сгорания топлива, уменьшению скорости распространения фронта пламени и полноты сгорания топлива, росту периода задержки зажигания. Результаты исследования [7] показывают, что при работе двигателя с искровым зажиганием на обедненной топливно-воздушной смеси ( $\alpha = 1,05$ ) добавка  $\text{CO}_2$  к топливу в количестве 20–40 % не приводит к снижению мощности, а при работе на несколько обогащенной топливно-воздушной смеси природного газа и 30 %  $\text{CO}_2$  ( $\alpha = 0,98$ ) происходит снижение мощности на 3 %, индикаторного КПД — более чем на 2 %.

При использовании НГТ в двигателях большой размерности также возникает проблема обеспечения стабильности зажигания и качества сгорания топливно-воздушной смеси. Эту проблему решают посредством использования форкамерно-факельного зажигания, при котором высокая энергия форкамерного факела стабилизирует процесс сгорания в цилиндре [1, 6]. В частности, фирмой Caterpillar разработан двигатель с системой форкамерно-факельного зажигания [6]. При этом к форкамере и цилиндру двигателя газ подается из одной топливной магистрали. В работе [5] показано, что форкамерно-факельное зажигание обедненных смесей биогаза ( $\text{CH}_4$  — 60 %;  $\text{CO}_2$  — 40 %) с воздухом позволяет обеспечить надежную работу двигателя. При этом эффективный КПД двигателя снижается на 1 % по сравнению с его работой на природном газе, а выбросы  $\text{CO}$  и  $\text{CH}$  с отработавшими газами (ОГ) уменьшаются соответственно на 15 и 8 %, эмиссия  $\text{NO}_x$  остается неизменной. Процесс сгорания обедненных смесей НГТ с воздухом практически не отличается от сгорания природного газа и несущественно зависит от содержания инертных компонентов  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}_2$  в топливе. Компенсировать снижение КПД двигателя удается за счет оптимизации его конструктивных и регулировочных параметров, в частности, степени сжатия, угла опережения зажигания, давления наддува, энергии зажигания.

В технической литературе представлены результаты исследований рабочих процессов дви-

гателей с форкамерно-факельным зажиганием на отдельных видах НГТ [1], проанализировано влияние некоторых компонентов НГТ на физико-химические и моторные свойства топливно-воздушной смеси и показатели двигателя [2, 12], но при этом отсутствует комплексная оценка влияния компонентного состава НГТ на рабочий процесс двигателя. Исследования, как правило, ограничены возможностями существующего экспериментального оборудования и носят узконаправленный характер.

Анализ конструкций отечественных стационарных двигателей показал, что широкие возможности для перевода на низкокалорийные газовые топлива имеет двигатель 11ГД100Мс форкамерно-факельным зажиганием и смесеобразованием в цилиндре. В 1960–1970-е гг. были выполнены широкие исследования рабочего процесса данного двигателя при работе на природном газе [13] и организовано его серийное производство на Харьковском заводе им. Малышева. За прошедшие годы двигатели 11ГД100М подтвердили высокие технико-экономические показатели в эксплуатации, соответствующие достижениям ведущих двигателестроительных фирм. К сожалению, несмотря на перспективность данного двигателя исследования возможности его перевода для работы на НГТ не проводятся.

Таким образом, актуальными остаются вопросы, связанные с исследованием влияния компонентного состава низкокалорийных газовых топлив на их моторные свойства и показатели двигателей с форкамерно-факельным зажиганием, а также перевода отечественных двигателей на использование НГТ.

### Влияние компонентного состава НГТ на их моторные свойства

Состав низкокалорийных газовых топлив широко изменяется в зависимости от исходного сырья (уголь, промышленные газы, бытовые отходы) способа и технологии производства (газификации или окисления), конфигурации и условий эксплуатации химического реактора или очистителей. Физико-химические свойства таких газов чрезвычайно разнообразны, однако только те газы, характеристики которых найдутся в определенном диапазоне, могут использоваться в газовых двигателях.

В таблице приведены физико-химические свойства некоторых НГТ, горючими компонентами которых являются  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  и незначительное количество тяжелых углеводородов. Остальные газы (около 10–50 % общего объема) – негорючие компоненты, в частности,  $N_2$ ,  $CO_2$  и  $O_2$ . Именно компонентный состав газового топлива определяет его моторные свойства.

Низшая теплота сгорания НГТ изменяется в широких пределах (3,5–27 МДж/м<sup>3</sup>), что в 1,5–10 раз меньше теплоты сгорания природного газа (35,9 МДж/м<sup>3</sup>). Например, синтез-газ и генераторный газ имеют соответственно в 3,4 и 5,8 раз меньшую объемную низшую теплоту сгорания по сравнению с природным газом. Это объясняется значительным содержанием в НГТ водорода, имеющего низкую объемную теплоту сгорания (характерно для синтез-газа), или большим содержанием инертных компонентов (генераторный газ). Низшая теплота сгорания определяет объемный расход топлива двигателем. Очевидно, что для обеспечения неизменной мощности двигателя по сравнению с рабо-

### Свойства низкокалорийных газовых топлив и их компонентов [8, 14]

Газ	Компонентный состав, % (об.)	$Q_n^*$ , МДж/м <sup>3</sup>	Предел воспламеняемости (нижний/верхний)	Ламинарная скорость ( $\alpha = 1$ ), см/с	$V_n$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	МЧ*	С/Н	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Природный газ	$CH_4$	35,0	2/0,6	41	9,55	100	3	0,716
Водород	$H_2$	10,8	10/0,15	270	2,38	0	–	0,0899
Моноксид углерода	$CO$	12,6	2,94/0,15	45	2,38	73	–	1,25
Синтез-газ	$H_2 = 35, CO = 52, CH_4 = 0,4, N_2 = 0,6, CO_2 = 12$	10,48	5,63/0,2	70	2,11	56,1	10,48	0,928
Пиролизный газ	$H_2=30, CO=35, CH_4=5, N_2=5, CO_2=25$	9,4	5,0/0,25	70	2,03	78	9,7	1,054
Шахтный газ	$CH_4=43,8, N_2=43,2, CO_2=2,2, O_2=9,8$	15,47	2,0/0,5	37	3,74	108	3,17	1,037
Биогаз	$CH_4=65, CO_2=35$	22,75	1,9/0,62	27	6,2	135	4,61	1,15
Коксовый газ	$H_2=55, CO=8, CH_4=31, N_2=3,8, CO_2=1,2, O_2=1$	17,8	4,43/0,4	100	4,42	40,5	2,056	0,46
Генераторный газ	$H_2=23, CH_4=2, N_2=42, CO_2=9, CO=24$	6,2	5,36/0,42	50	1,31	70,7	7,73	1,037

Примечание.  $Q_n^*$  – низшая теплота сгорания;  $V_n$  – необходимое количество воздуха для сгорания. \* – Метановое число, рассчитанное по методике AVL.

той на природном газе нужно увеличивать объемную цикловую подачу НГТ.

Важной характеристикой газового топлива является метановое число (МЧ), определяющее возможность работы двигателя при высоких степенях сжатия. Из таблицы видно, что шахтный газ, биогаз и генераторный газ имеют сравнительно высокие значения метанового числа (70–135). Однако коксовый газ и синтез-газ имеют низкие МЧ (30–60), что объясняется высоким содержанием водорода. Газы, которые имеют переменное или низкое МЧ, склонны к детонации, что приводит к возникновению ударных механических и тепловых нагрузок на детали двигателя.

На процесс сгорания в двигателе с принудительным зажиганием значительно влияет наличие инертных компонентов (в частности,  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$ ), входящих в состав НГТ. На рис.1 показаны зависимости, характеризующие влияние различных инертных компонентов на метановое число и границы воспламеняемости. Эти компоненты не принимают активного участия в процессе сгорания, однако оказывают влияние на МЧ газового топлива (рис.1, а). При этом влияние содержания  $\text{CO}_2$  на МЧ в 3 раза выше, чем влияние  $\text{N}_2$  [15]. Например, для газа, содержащего 10 %  $\text{CO}_2$ , 20 %  $\text{N}_2$ , 70 %  $\text{CH}_4$ , МЧ = 117, а для газа с 20 %  $\text{CO}_2$ , 10 %  $\text{N}_2$ , 70 %  $\text{CH}_4$  — 124.

Инертный компонент  $\text{CO}_2$  является трехкомпонентным газом со сравнительно высокой теплоемкостью. Например, теплоемкость  $\text{CO}_2$  при температуре 1500 °С составляет 44,035 кДж/(кмоль · °С), что в 1,8 раз больше теплоемкости  $\text{N}_2$  при этой температуре. Повышенное содержание  $\text{CO}_2$  в НГТ может привести к уменьшению максимального давления и температуры в цикле, следовательно, снижению термодинамической эффективности цикла.

Значения пределов зажигания определяют возможности эффективного обеднения или обогащения топливно-воздушной смеси: верхний предел соответствует максимальному обогащению смеси, нижний — максимальному обеднению. Из рис.1, б, видно, что повышение содержания инертных компонентов в топливе приводит к уменьшению нижней и увеличению верхней границ зажигания. При этом влияние инертного компонента  $\text{CO}_2$  на пределы зажигания более существенно, чем с  $\text{N}_2$ .  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  имеют более широкие пределы воспламеняемости (0,15–10 и 0,15–2,95 соответственно), а их наличие расширяет данные пределы для НГТ. Из таблицы видно, что синтез-газ, пиролизный, коксовый, генераторный и шахтный газы имеют

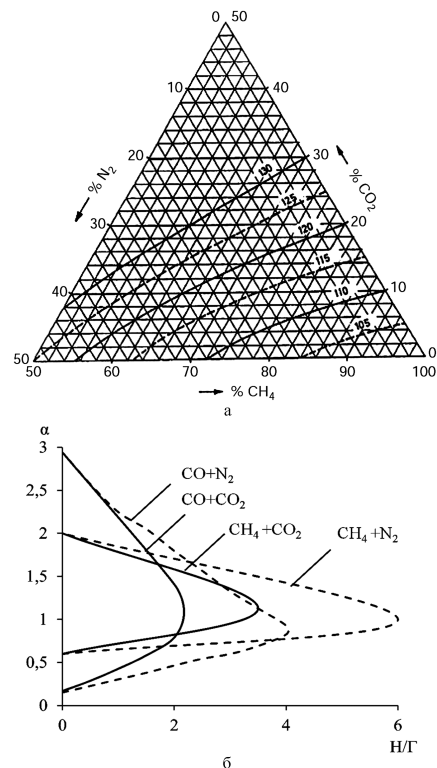


Рис.1. Влияние содержания инертных компонентов на метановое число (а) [16] и границы воспламеняемости топливно-воздушной смеси (б): Н/Г — соотношение негорючих и горючих компонентов.

более широкие пределы зажигания, чем другие НГТ. Расширение границ воспламенения НГТ способствует улучшению запуска двигателя при низких температурах, повышает надежность зажигания и полноту сгорания обедненных топливно-воздушных смесей.

Ламинарная скорость сгорания топлива обуславливает степень повышения давления в цилиндре и жесткость рабочего процесса двигателя. Это свойство зависит от состава топлива и степени обеднения газо-воздушной смеси. С увеличением скорости сгорания растут нагрузки на детали кривошипно-шатунного механизма. Кроме того, увеличивается максимальная температура рабочего тела, что приводит к росту выбросов оксидов азота. Однако с уменьшением скорости сгорания возрастает неполнота сгорания топлива и ухудшается топливная экономичность двигателя.

Наличие водорода в топливе приводит к существенному увеличению скорости сгорания и, как следствие, уменьшению неполноты сгорания НГТ. Из таблицы видно, что для шахтного газа и биогаза скорость сгорания меньше, чем для природного газа, а для генераторного, пиролизного и коксового газов — больше. Можно предположить, что соответствующую тенденцию

изменения будет иметь и полнота сгорания указанных топлив.

С увеличением соотношения С/Н, то есть с увеличением содержания углерода в топливе, топливно-воздушные смеси сгорают при более высоких температурах (при одинаковых условиях сгорания). Это объясняется тем, что для сгорания единицы массы углерода необходимо в 3 раза меньшее количество воздуха, чем для горения водорода. Теплота сгорания топлива выделяется в меньшем объеме газа, что приводит к увеличению температуры. Очевидно, наибольшие температуры будут иметь место при сгорании синтез-газа, генераторного и пиролизного газов, наименьшие — биогаза, шахтного и коксового газов.

Очевидно, что лучшими моторными свойствами обладают НГТ, имеющие высокие значения метанового числа и объемной теплоты сгорания, низкое содержание инертных компонентов и соотношение С/Н, широкие пределы зажигания и высокую скорость сгорания. Однако повышение содержания отдельных компонентов в составе НГТ (в частности,  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2$ ) неоднозначно влияет на моторные свойства топлива, что приводит к улучшению одних моторных свойств и ухудшению других. Оценить комплексное воздействие свойств низкокалорийных газовых топлив на показатели двигателей, в частности, 11ГД100М возможно по результатам математического моделирования их рабочих процессов.

### Влияние моторных свойств НГТ на показатели газового двигателя 11ГД100М

Моделирование рабочего цикла двигателя 11ГД100М проводилось с использованием математической модели, разработанной на кафедре двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «ХПИ» [17, 18].

На рис.2 приведены расчетные индикаторные диаграммы и характеристики тепловыделения двигателя 11ГД100М на режиме работы при использовании НГТ: 1 — природный газ; 2 — синтез-газ; 3 — пиролизный газ; 4 — шахтный газ; 5 — биогаз; 6 — коксовый газ; 7 — генераторный газ; а —  $P_s = 0,127$  МПа; б —  $P_s = \text{var}$ , при одинаковых  $\alpha = 1,92$ .

Видно, что при использовании синтез-газа, генераторного и пиролизного газов в цилиндре двигателя увеличивается скорость сгорания, уменьшается период задержки воспламенения и, как следствие, увеличивается на 4,7–9 % максимальное давление, что приводит к повышению жесткости цикла. Это можно объяснить наличием в указанных топливах значительного количества водорода, имеющего высокую скорость сгорания и низкую теплоемкость. Кроме того, наличие большого количества водорода в

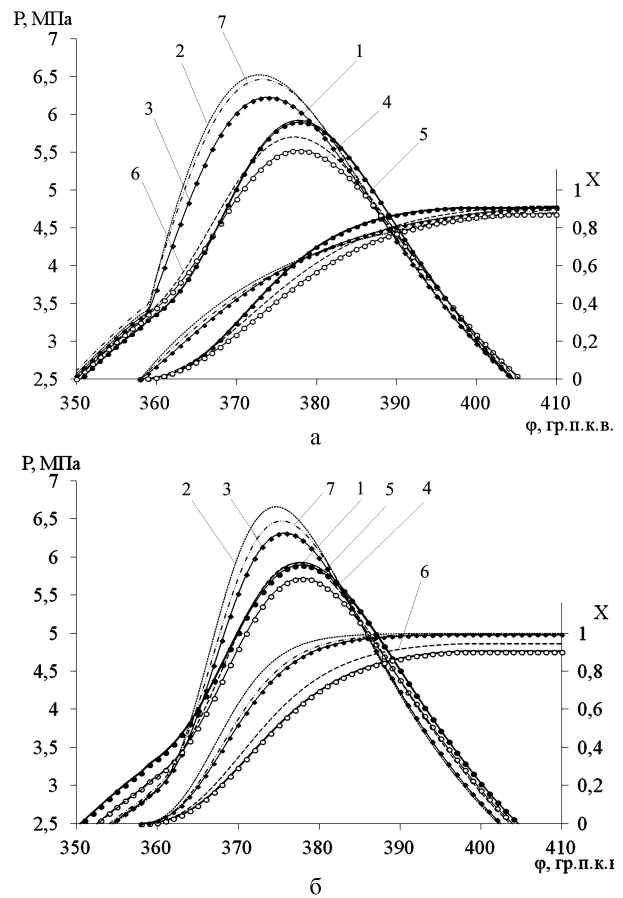


Рис.2. Расчетные индикаторные диаграммы и характеристики тепловыделения двигателя 11ГД100М на номинальном режиме работы при использовании НГТ: 1 — природный газ; 2 — синтез-газ; 3 — пиролизный газ; 4 — шахтный газ; 5 — биогаз; 6 — коксовый газ; 7 — генераторный газ; а —  $P_s = 0,127$  МПа; б —  $P_s = \text{var}$ , при одинаковых  $\alpha = 1,92$ .

этих НГТ приводит к расширению границ воспламенения и сгорания, а, следовательно, и увеличению на 4,2–4,6 % полноты сгорания (рис.3). Полученные результаты хорошо коррелируют с данными других работ [1, 12].

При использовании шахтного газа в качестве топлива уменьшается на 0,5 МПа максимальное давление сгорания (см. рис.2) и на 4,6 % индикаторный КПД (рис.3, а) по сравнению с работой на природном газе. В цилиндре двигателя увеличивается коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  от 1,92 до 2,06, что приводит к уменьшению скорости и полноты сгорания топлива (рис.3, г).

Процесс сгорания биогаза в цилиндре двигателя 11ГД100М протекает без существенных изменений в рабочем цикле. При этом индикаторный КПД, давление сгорания и коэффициент избытка воздуха практически не изменяются.

Наибольшие значения объемного расхода топлива наблюдаются при использовании гене-

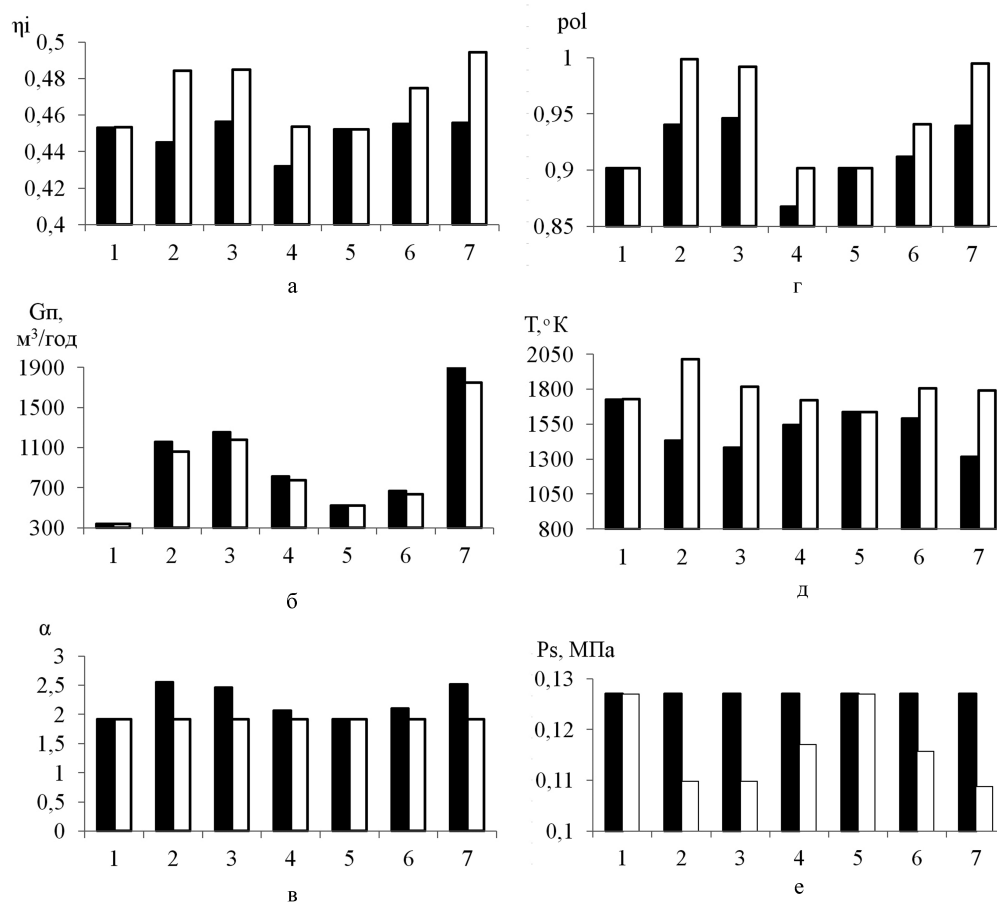


Рис.3. Показатели двигателя 11ГД100М на номинальном режиме черный  $P_s = 0,127$  МПа, белый —  $P_s = \text{var}$  ( $N_e = 1100$ кВт, при использовании НГТ: а — индикаторный КПД; б — объемный расход топлива; в — коэффициент избытка воздуха; г — полнота сгорания топлива; д — максимальная температура сгорания; е — давление наддува. 1 — природный газ; 2 — синтез-газ; 3 — пиролизный газ; 4 — шахтный газ; 5 — биогаз; 6 — коксовый газ; 7 — генераторный газ.

раторного газа, имеющего меньшую в 5,6 раз низшую объемную теплоту сгорания по сравнению с природным газом. Конвертация двигателя 11ГД100М для использования генераторного газа требует коренных изменений в конструкции топливной аппаратуры и является, на наш взгляд, нецелесообразной. Наименьший рост объемного расхода топлива наблюдается в случае использования шахтного газа, биогаза и коксового газа. Очевидно, что применение этих НГТ потребует наименьших изменений в конструкции газовой аппаратуры исследуемого двигателя.

Из рис.3, в видно, что коэффициент избытка воздуха при использовании низкокалорийных газов (кроме биогаза) значительно возрастает по сравнению с природным газом, что объясняется уменьшением в 1,9–8,7 раз необходимого количества воздуха для сгорания 1 кг НГТ (см. таблицу). Как следствие, увеличивается неполнота сгорания большинства

НГТ, что является одной из причин ухудшения экономичности двигателя 11ГД100М при работе на указанных топливах. По результатам проведенного расчетного исследования можно сделать вывод, что наилучшим образом из рассмотренных НГТ на показатели двигателя 11ГД100М влияют биогаз, шахтный и коксовый газы. При этом обеспечиваются приемлемые показатели жесткости цикла, эффективности рабочего процесса и экономичности двигателя.

#### Регулирование состава топливно-воздушной смеси

Выше показано, что при использовании НГТ увеличивается коэффициент избытка воздуха в цилиндре двигателя на 0,3–25 %, что приводит к увеличению неполноты сгорания некоторых НГТ и ухудшению эффективности рабочего процесса двигателя. Поэтому в работе рассмотрена возможность уменьшения количества окислителя при неизменной цикловой пода-

че топлива. Это достигается уменьшением давления наддувочного воздуха  $P_s$ , чрезмерное снижение которого может привести к ухудшению продувки и очистки цилиндра от отработавших газов.

С целью определения влияния давления наддува на показатели рабочего процесса двигателя 11ГД100М и выявления возможности повышения его экономичности при работе на НГТ выполнены расчеты рабочих процессов двигателя при  $\alpha = 1,92$ , то есть значениях избытка воздуха, при которых работает исследуемый двигатель на природном газе.

На рис.2, б и рис.3 приведены показатели двигателя 11ГД100М, работающего на НГТ при одинаковых значениях коэффициентов избытка воздуха. Видно, что при работе двигателя 11ГД100М на обедненных до  $\alpha = 1,92$  топливно-воздушных смесях наблюдается повышение индикаторных показателей цикла на 4–8,5 %. Данный положительный эффект можно объяснить увеличением скорости сгорания и температуры цикла (рис.3, д), и как следствие, увеличением полноты сгорания топлива.

Следствием повышения индикаторного КПД цикла при обогащении топливно-воздушной смеси является улучшение топливной экономичности двигателя. Из рис.3 видно, что объемный расход топлива уменьшается на 5–8 % в зависимости от вида НГТ. Так, например, при использовании синтез-газа, генераторного газа или пиролизного газа уменьшение  $\alpha$  приводит к повышению индикаторного КПД на 6–8,5 % и максимальной температуры цикла на 30–40 %, полнота сгорания при этом приближается к 1. Давление наддува при этом  $P_s = 0,109–0,11$  МПа, что может привести к ухудшению очистки цилиндра от ОГ. Обогащение топливно-воздушной смеси от 2,06 до 1,92 при использовании шахтного газа также приводит к увеличению индикаторного КПД, который приближается к соответствующему показателю при работе на природном газе. При этом давление наддува уменьшается до  $P_s = 0,117$  МПа.

Таким образом, показано, что оптимизация давления наддувочного воздуха является эффективной мерой повышения эффективности рабочего процесса двигателя 11ГД100М при его работе на НГТ.

### Выводы

Низкокалорийные газовые топлива целесообразно использовать в двигателях с форкамерно-факельным зажиганием обедненных топливно-воздушных смесей. Такие двигатели менее чувствительны к изменению компонентного состава топлива.

Показано, что наилучшими свойствами обладают НГТ, имеющие высокие значения метанового числа, объемной низшей теплоты сгорания, низкое содержание инертных компонентов и широкие пределы зажигания. Однако повышенное содержание отдельных компонентов НГТ неоднозначно влияет на свойства топлива и показатели двигателей.

При использовании синтез-газа, генераторного и пиролизного газов в цилиндре двигателя увеличивается скорость сгорания, уменьшается период задержки воспламенения и, как следствие, увеличиваются максимальное давление и жесткость цикла. При этом существенно увеличивается объемный расход топлива, что требует коренной модификации газовой аппаратуры двигателя. Лучшие показатели двигателя 11ГД100М наблюдаются при использовании биогаза, шахтного и коксового газов.

Показано, что эффективным мероприятием улучшения показателей двигателя 11ГД100М при использовании НГТ является оптимизация состава топливно-воздушной смеси.

### Список литературы

- Goto S., Nishi H., Nakayama S., Takahashi S. Developmen of Hight Density Gas Engine 22AG // IHI Engineering Review. — 2004. — Vol. 37, № 3. — P. 104–107.
- Yamasaki Y., Tomatsu G., Nagata Y., Kaneko S. Combustion Characteristics of Low-Calorific-Value Gaseous Fuels in Small Gas Engine // Journal of Environment and Engineering. — 2009. — Vol. 4, № 1. — P. 188–197.
- Przybyla G., Ziolkowski L., Szlek A. Performance of SI engine fuelled with LCV gas. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: — [http://s3.amazonaws.com/zanran\\_storage/www.mam.gov.tr/Content/Pages/17571677.pdf](http://s3.amazonaws.com/zanran_storage/www.mam.gov.tr/Content/Pages/17571677.pdf).
- Razbani O., Mirzamohammad N., Assadi M. Literature review and road map for using biogas in internal combustion engines // Third International Conference on Applied Energy. — 16–18 May, 2011. — Perugia, Italy.
- Roubaud A., D. Favrat. Improving performances of a lean burn cogeneration biogas engine equipped with combustion prechambers // Fuel. — 2005. — Vol. 84, № 16. — P. 2001–2007.
- Mueller G. P. Landfill Gas Application Development of the Caterpillar G3600 Spark-Ignited Gas Engine // J. Eng. Gas Turbines Power. — 1995. — Vol. 117, № 4. — P. 820–825.
- Huang J., Crookes R.J. Assessment of simulated biogas as a fuel for the spark ignition engine // Fuel. — 1998. — Vol. 77, № 15. — P. 1793–1801.
- Трегуб Е. Европейский опыт утилизации сбросного энергopotенциала промышленных газов // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». — 2012. — № 7.

9. GE Power & Water. Distributed Power – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ge-distributedpower.com/products/power-generation>.
10. Токарев Г.Г. Газогенераторные автомобили. – М.: Машгиз, 1955. – 270 с.
11. Munoz M., Moreno F. Morea-Roy J., Ruiz J., Arauzo J. Low heating value gas on spark ignition engines // Biomass & Bioenergy. – 2000. – № 15. – P. 431–439.
12. Suryawanshi G. Jiwak & Nitnaware T. Pravin. An investigation on S.I engine using hydrogen and CNG blends // International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences. – 2011. – Vol. 7, № 3. – P. 295–303.
13. Генкин К.И., Аксенов Д.Т., Струнге Б.Н. Газовые двигатели ГД100 и агрегаты на их базе. – Л.: Недра, 1970. – 328 с.
14. Przybyla G., Postrzednik S., Zmudka Z. Energy analysis of a small capacity SI engine fueled with lean air gas mixture // Powertain and Transport. – 2012. – Vol. 19, № 2. – P. 423–432.
15. Мыслик М.И., Свистула А.Е. Анализ теплофизических свойств альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1–2. – С. 37–43.
16. Mollenhauer Klaus, Tschoeke Helmut. Handbook of Diesel Engines / Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2010. – 636 p.
17. Марченко А.П., Осетров О.О., Кравченко С.С. Обґрунтування вибору моделі теплообміну в циліндрі стаціонарного газового двигуна 11ГД100М // Вісник НТУ «ХП». Серія: Транспортне машинобудування. – 2014. – № 14 – С. 72–82.
18. Марченко А.П., Осетров О.О., Кравченко С.С. Дослідження та математичне моделювання процесу згоряння в двигуні з форкамерно-факельним запалюванням // Двигатели внутреннего сгорания. – 2014. – № 2. – С. 12–19.

Поступила в редакцию 20.11.14

**Марченко А.П.,** докт. техн. наук, **Осетров О.О.,** канд. техн. наук,  
**Кравченко С.С.,** аспірант, **Хамза О.А.,** аспірант  
 Національний технічний університет «Харківський політехнічний  
 інститут», Харків  
 вул. Фрунзе, 21, 61002 Харків, Україна, e-mail: [dvska@pi.kharkov.ua](mailto:dvska@pi.kharkov.ua)

## Моторні властивості низькокалорійних газових палив та їх вплив на показники двигунів внутрішнього згоряння

Виконано аналіз можливості використання низькокалорійних газових палив (НГП) у двигунах 11ГД100М з форкамерно-факельним запалюванням та якісним регулюванням потужності. Проаналізовано властивості НГП та їх вплив на показники робочих процесів двигуна. Показано, що двигуни з форкамерно-факельним запалюванням менш чутливі до зміни компонентного складу палива та більш пристосовані до спалювання збіднених сумішей НГП з повітрям. Виконано розрахункове дослідження робочого процесу двигуна 11ГД100М при його роботі на НГП. Показано, що використання усіх видів НГП призводить до збільшення об'ємної витрати палива двигуном. При цьому найкращі індикаторні показники двигуна спостерігаються при використанні піролізного, коксового та генераторного газів. Проаналізовано спосіб збагачення складу паливно-повітряної суміші як ефективний захід для покращення показників двигуна при роботі на НГП. *Бібл. 18, рис. 3, табл. 1.*

**Ключові слова:** пазовий двигун, форкамерно-факельне запалювання низькокалорійні газові палива, показники двигуна.



**Marchenko A. P.**, Doctor of Technical Science, **Osetrov A. A.**, Candidate of Technical Science, **Kravchenko S. S.**, PhD Student, **Hamzah O. A.**, PhD Student  
**National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute»**, Kharkov  
 21, Frunze Str., 61002 Kharkov, Ukraine, e-mail: dvs@kpi.kharkov.ua

## Motor Properties of Low Calorific Gas Fuels and Their Impact on the Performance of Internal Combustion Engines

The paper analyzes the possibility of using low-calorie gas fuels (LCG) in engines 11GD100M pre-chamber-flare ignition and quality control capacity. The properties of LCG and their effect on the workflow engine. It is shown that engines pre-chamber-flare ignition is less sensitive to changes in the component composition of the fuel and are more adapted to burning lean LCG with air. Performed numerical modeling workflow engine 11GD100M with his work on LCG. It has been shown that the use of all types of LCG leads to an increase in bulk fuel engine. In this case, the best indicator of engine performance are observed when using the pyrolysis gas, coke oven gas and the gas generator. Analyzed by the method of enrichment of the air-fuel mixture as a measure to improve engine performance during operation in LCG. *Bibl. 18, Fig. 3, Table 1.*

**Key words:** gas engine, pre-chamber-flare ignition, low-calorie gas fuel, performance of the engine.

### References

- Goto S., Nishi H., Nakayama S., Takahashi S. Development of High Density Gas Engine 22AG. *IHI Engineering Review*, 2004, 37, (3), pp. 104–107.
- Yamasaki Y., Tomatsu G., Nagata Y., Kaneko S. Combustion Characteristics of Low-Calorific-Value Gaseous Fuels in Small Gas Engine [*Journal of Environment and Engineering*], 2009, 4, (1), pp. 188–197.
- Przybyla G., Ziolkowski L., Szlek A. Performance of SI engine fuelled with LCV gas – [Electron. resource]. – Mode of access: [http://s3.amazonaws.com/zanran\\_storage/www.mam.gov.tr/ContentPages/17571677.pdf](http://s3.amazonaws.com/zanran_storage/www.mam.gov.tr/ContentPages/17571677.pdf).
- Razbani O., Mirzamohammad N., Assadi M. Literature review and road map for using biogas in internal combustion engines, Third International Conference on Applied Energy. (Perugia, Italy, 16–18 May, 2011).
- Roubaud A., Favrat D. Improving performances of a lean burn cogeneration biogas engine equipped with combustion prechambers, *Fuel*, 2005, 84, (16), pp. 2001–2007.
- Mueller G. P. Landfill Gas Application Development of the Caterpillar G3600 Spark-Ignited Gas Engine, *J. Eng. Gas Turbines Power*, 1995, 117, (4), pp. 820–825.
- Huang J., Crookes R.J. Assessment of simulated biogas as a fuel for the spark ignition engine, *Fuel*, 1998, 77, (15), pp. 1793–1801.
- Tregub E. [European experience in recycling waste energy industrial gases] *Jeletkronnyj zhurnal jenergoservisnoj kompanii «Jekologicheskie sistemy*, 2012, (7). (Rus.)
- GE Power & Water. Distributed Power – [Electron. resource]. – Mode of access: <https://www.ge-distributedpower.com/products/power-generation>.
- Tokarev G.G. Gazogeneratornyye avtomobili [*Gas-generating cars*]. Moscow : Mashgiz, 1955, 270 p. (Rus.)
- Munoz M., Moreno F. Morea-Roy J., Ruiz J., Arauzo J. Low heating value gas on spark ignition engines, *Biomass & Bioenergy*, 2000, (15), pp. 431–439.
- Suryawanshi G. Jiwak, Nitnaware T. Pravin. An investigation on S.I engine using hydrogen and CNG blends. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 2011, 7, (3), pp. 295–303.
- Genkin, K.I., Aksenov D.T., Strunge B.N. Gazovye dvigateli GD100 i agregaty na ih baze [*GD100 gas engines and aggregates based on them*]. Leningrad : Nedra, 1970, 328 p. (Rus.)
- Przybyla G., Postrzednik S., Zmudka Z. Energy analysis of a small capacity SI engine fueled with lean air gas mixture, [*Powertain and Transport*]. 2012, 19, (2), pp. 423–432.
- Mysnik M.I. Svistula A.E. Analiz teplofizicheskikh svojstv al'ternativnyh topliv dlja dvigatelej vnutrennego sgoranija [Analysis of thermo-physical properties of alternative fuels for internal combustion engines]. *Polzunovskij vestnik*, 2009 (1–2), pp. 37–43. (Rus.)
- Mollenhauer Klaus, Tschoeke Helmut. Handbook of Diesel Engines, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, 636 p.
- Marchenko A.P., Osetrov O.O., Kravchenko S.S. [Rationale model of heat transfer in the cylinder stationary gas engine 11GD100M]. *Visnik NTU «HPI»*. Serija: *Transportne mashinobuduvannja..* – 2014, (14), pp. 72–82. (Ukr.)
- Marchenko A.P., Osetrov O.O., Kravchenko S.S. Doslidzhennja ta matematychni modeljuvannja procesu zgorjannja v dvyguni z forkamerno-fakel'nyim zapaljuvannjam [The study and mathematical modeling of the combustion process in the engine with ignition-ignition torch]. *Dvigateli vnutrennego sgoranija*, 2014, (2), pp. 12–19. (Ukr.)

Received November 20, 2014