

УДК 621.43.057

С.А. Плотников¹, П.Я. Кантор¹, А.С. Зубакин¹, М.Н. Втюрина²**О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ
НА ГЕНЕРАТОРНОМ ГАЗЕ**Вятский государственный университет¹
Вятская государственная сельскохозяйственная академия²

Объектом исследования является топливная смесь, состоящая из бензина и генераторного газа. Цель – исследование влияния молекулярного состава горючих компонентов на характер процесса их сгорания, методологическая основа – системный анализ. В качестве основной задачи можно обозначить теоретические расчеты времени сгорания смеси бензина с генераторным газом. Определены оптимальные значения угла опережения зажигания искрового двигателя. На основе теоретического анализа происходящих процессов предложено выражение для оценки времени сгорания капли бензина. Расчеты показывают, что при прочих равных условиях время сгорания генераторного газа в цилиндре двигателя оказывается несколько больше времени сгорания бензина, что приводит к необходимости увеличения угла опережения зажигания (УОЗ). Данные расчетов проверены экспериментально на двигателе 1Ч 6,3/5,4. Установлены фактические значения оптимальных УОЗ для каждого вида топлива.

Ключевые слова: генераторный газ, бензин, зажигание, двигатель, процесс сгорания, токсичные компоненты.

Использование генераторного газа в качестве моторного топлива для ДВС впервые упоминается в конце XIX в. В настоящее время генераторный газ является реальной альтернативой товарному моторному топливу в отдаленных районах нашей страны, где доставка традиционного топлива является достаточно затратной. Особенно экономически выгодно использовать генераторный газ, полученный из отходов лесопиления, сельскохозяйственного производства и т.п. [1]. Как отмечается многими исследователями, падение развиваемой мощности двигателем достигает 50 % при работе на генераторном газе [1-3]. Известны различные способы компенсации этого эффекта, например, повышение степени сжатия, увеличение сечения впускного тракта, установка оптимального УОЗ. Наиболее перспективна работа на смесях бензина и генераторного газа. Особенно актуальным является такой способ при работе двигателя в нестационарных режимах (пуск, перегрузка, переходные режимы). Процесс сгорания чистого генераторного газа, как и смеси генераторного газа и бензина, не описан в научной литературе и требует дальнейших теоретических и практических исследований. На основании изложенного можно сформулировать цель: изучение процесса сгорания генераторного газа, его смеси с бензином.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

- предопределить химические аспекты сгорания различных видов топлива;
- установить теоретически оптимальные значения угла опережения зажигания (УОЗ) для каждого вида топлива;
- подтвердить или опровергнуть теоретические предпосылки путем исследования процесса сгорания;
- сделать выводы на основании полученных результатов.

Теоретическая часть

Сгорание генераторного газа отличается от сгорания бензина вследствие различного химического состава (табл. 1) и агрегатного состояния. Как известно, основными горючими

компонентами ГГ являются водород H_2 и монооксид углерода CO , содержание которых составляет, соответственно, 12...20 % и 17...32 % по объему. Известно также, что «процесс превращения» исходных углеводородов в конечные продукты горения – CO_2 и H_2O разделен на две стадии [3, с. 45]:

- на первой, протекающей с очень высокой скоростью, происходит окисление углеводородов до CO ;
- на второй, медленной стадии, CO окисляется до CO_2 .

Таблица 1

Химический состав генераторного газа

Наименования сырья	Горючие компоненты, %				Балласт, %		
	H_2	C_nH_m	CO	CH_4	O_2	N_2	CO_2
Древесные чурки, $\omega=20\%$	14-18	0,1-0,3	18-22	2,1-2,5	1,4-1,8	48-52	8-10

Основная цель настоящего исследования состоит в качественном объяснении этого эффекта. Отметим некоторые особенности молекулярного строения H_2 и CO , обуславливающие их особенности, как горючих веществ. Обе молекулы весьма прочны. Известно, что энергия связи молекулы водорода составляет 432 кДж/моль, энергия активации процесса окисления 242 кДж/моль [4]. Энергия связи молекулы монооксида углерода составляет 1069 кДж/моль, энергия активации – 201 кДж/моль. Прочность молекулы CO обусловлена наличием тройной связи между атомами углерода и кислорода: две ковалентные связи образованы за счет спаривания двух p -электронов атома кислорода с аналогичными электронами атома углерода, третья связь создана неподеленной электронной парой атома кислорода по донорно-акцепторному механизму. Реакция горения водорода и монооксида углерода инициируется следующими процессами (1), (2):



Константа k скорости химической реакции обычно определяется уравнением Аррениуса (3):

$$k = Ae^{-\frac{E}{RT}}, \tag{3}$$

где E – энергия активации; T – абсолютная температура; R – универсальная газовая постоянная; A – предэкспоненциальный множитель, характеризующий эффективность столкновений молекул реагирующих веществ.

Согласно данным исследований, для реакции (2) значение множителя A равно $2,5 \cdot 10^{12}$ см³/(моль×с) [4, 5]. Скорость реакции определяется как:

$$\frac{dC}{dt} = C_1 C_{O_2} k = C_1 C_{O_2} Ae^{-\frac{E}{RT}}, \tag{4}$$

где C_1 – концентрация горючего (водорода или монооксида углерода); C_{O_2} – концентрация кислорода.

Применительно к процессам, происходящим в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, выражение (4) следует расценивать как сугубо оценочное, пригодное только для ориентировочных оценок времени горения по следующим причинам. Во-первых, температура газа в процессе сгорания топлива возрастает приблизительно в 2,5 раза, что, вследствие вышеуказанной экспоненциальной зависимости, приводит к возрастанию скорости реакции на несколько порядков. Во-вторых, процесс горения развивается по цепному механизму, в котором важнейшую роль играют свободные радикалы (1) и (2). Это обстоятельство также приводит к существенному росту скорости реакции по сравнению с (3). Попытки детального анализа про-

цесса горения углеводородов с количеством атомов углерода от 7 до 16 приводят к необходимости рассмотрения около 8 000 элементарных реакций [6], что, в свою очередь, требует чрезвычайно больших объемов вычислительной работы. Ситуация осложняется еще и тем, что для многих из элементарных реакций отсутствует надежная информация относительно констант их скоростей.

Согласно данным исследований, энергия активации для паров бензина составляет 78,5...80 кДж/моль [7], что в 2,5 раза меньше энергии активации для монооксида углерода. При этом предэкспоненциальный множитель в (3), определяемый эффективными сечениями взаимодействующих молекул, для реакций горения водорода, монооксида углерода и паров бензина должен быть одинаковым по порядку величины. Однако многократного увеличения скорости сгорания бензина по сравнению с генераторным газом, которого следовало бы ожидать вследствие экспоненциальной зависимости от энергии активации, не происходит. Это связано, по-видимому, с тем, что испарение капель бензина, диаметр которых, по данным разных источников, составляет от 0,02 мм до 0,2 мм, представляет собой достаточно медленный процесс, лимитирующий скорость его сгорания. Для оценки времени испарения капли бензина воспользуемся результатами исследований [8]. Согласно экспериментальным данным, скорость испарения капли жидкого углеводорода, определяемая производной квадрата ее диаметра по времени, в зависимости от температуры при $T \geq 650$ К носит приближенно линейный характер [8]. Экстраполируя указанную зависимость на область температур, характерных для процесса горения бензина, получаем, что при $T = 2200$ К скорость уменьшения квадрата диаметра капли равна (5):

$$K = \left| \frac{d(d^2)}{dt} \right| = 4,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (5)$$

Для оценки времени τ испарения капли бензина, практически равного, согласно вышесказанному, времени ее сгорания, примем начальный диаметр капли равным $d_0 = 0,065$ мм, что согласуется с данными относительно характера распыления топлива при низких давлениях [9, с. 44]. Тогда предварительную оценку времени сгорания можно провести по следующему выражению (6):

$$\tau = \pi d_0^2 / K. \quad (6)$$

Подсчитанное по выражению (6) значение времени сгорания для бензина будет равно $\tau = 0,0031$ с. Сочетание вышеуказанных факторов приводит к тому, что при прочих равных условиях время сгорания генераторного газа в цилиндре двигателя оказывается несколько больше времени сгорания бензина. Это обстоятельство приводит к необходимости увеличения угла опережения зажигания (УОЗ) при работе двигателя на генераторном газе. Нами был проведен расчет сравнительного промежутка времени процесса сгорания в цилиндре искрового двигателя при его работе на чистом бензине, чистом ГГ и смеси, содержащей 30 % бензина и 70 % ГГ. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Данные расчета сравнительного промежутка времени процесса сгорания

Частота вращения, мин ⁻¹	Состав смеси	Время сгорания, с
3000	Бензин – 100%	0,0031
3000	30%Б + 70%ГГ	0,0036
3000	Генераторный газ -100%	0,0039

Расчеты показывают, что для заданных условий работы двигателя время сгорания генераторного газа по сравнению с аналогичным значением для чистого бензина увеличивается

примерно на 0,001 с. Для случая использования смеси, содержащей 30 % бензина и 70 % генераторного газа, это увеличение составляет 0,0005 с.

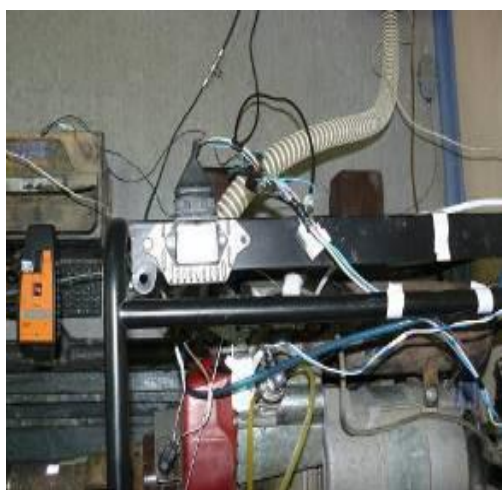
Таким образом, если при работе двигателя на чистом бензине оптимальное значение УОЗ равно 27° , то, с учетом данных расчетов, для нормальной работы искрового ДВС на чистом ГГ значение УОЗ должно составлять приблизительно $38...42^\circ$. В случае же использования смеси, содержащей 30 % бензина и 70 % ГГ значение УОЗ должно составлять $34...36^\circ$.

Методика проведения эксперимента

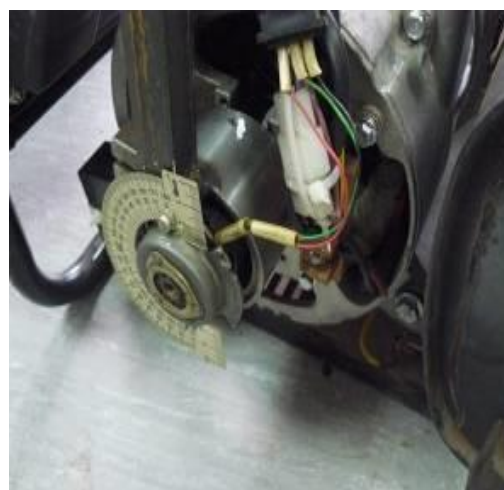
Определение оптимального угла опережения зажигания проводилось в соответствии с ГОСТ 14846-81 «Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний» (СТ СЭВ 765-77) по регулировочным характеристикам при постоянной частоте вращения 3000 мин^{-1} и постоянном положении дроссельной заслонки. Все испытания проводились при стандартных атмосферных условиях, температуре и плотности топлива.

Экспериментальная часть

Для определения оптимального значения УОЗ на различных видах топливах на одноцилиндровый двигатель воздушного охлаждения 1Ч 6,3/5,4 в составе лабораторного стенда, была установлена система электронного зажигания высокой мощности (рис. 1). Данная система позволяет изменять значение УОЗ при работе двигателя в пределах $\pm 90^\circ$ от ВМТ. Программный комплекс DiaMag-2, в составе которого присутствует восьмиканальный осциллоскоп, позволял одновременно получать информацию по 8 каналам, а также производить запись получаемого сигнала в память ПЭВМ. Данные давали возможность графически оценить момент образования искры на диаграмме давления, что значительно облегчало анализ полученных данных [10]. За основу конструкции был использован датчик-распределитель 40.3706 с датчиком Холла. Для визуального контроля угла опережения зажигания и предварительной настройки на передней части был закреплен угломер. На переднем носке коленчатого вала был установлен датчик положения ВМТ для обеспечения работы программного комплекса DiaMag-2.



а)



б)

Рис. 1. Общий вид модернизированной системы зажигания (а) и регулируемый датчик-распределитель с датчиком Холла (б)

Результаты и выводы

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Работа искрового ДВС возможна на бензине, генераторном газе, а также их смеси.
2. Значение оптимального УОЗ для двигателя 1Ч6,8/5,4 при его работе на бензине должно находиться в пределах $26...28^\circ$ до ВМТ, на ГГ – $38...42^\circ$ до ВМТ, и при работе на смеси, содержащей 30 % бензина и 70% ГГ – $34...36^\circ$ до ВМТ, соответственно.
3. Фактические значения оптимальных УОЗ: для бензина – 26° , для ГГ – 40° , для смеси, содержащей 30 % бензина и 70 % ГГ – 36° .

Библиографический список

1. **Плотников, С.А.** Определение количественных характеристик двигателя бытовой электростанции при использовании генераторного газа в качестве альтернативного топлива / С.А. Плотников и др. // Problemele Energeticii Regionale Termoenergetica. – № 2 (34). – 2017. – С. 105-111.
2. **Зубакин, А.С.** Определение оптимального угла опережения зажигания двигателя 1Ч 6,8/5,4 при работе на генераторном газе и смеси бензина и генераторного газа. / А.С. Зубакин, А.С. Кузнецов // Успехи современной науки. – №7. – 2017. – С. 132-163.
3. **Корольченко, А.Я.** Процессы горения и взрыва / А.Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2007. – 266 с.
4. **Гардинер, У.** Химия горения / У. Гардинер. – М.: Мир, 1988. – 464 с.
5. **Басевич, В.Я.** Кинетика «голубых» пламен при газофазном окислении и горении углеводородов и их производных / В.Я. Басевич, С.М. Фролов // Успехи химии. – № 76 (9). – 2007. – С. 927-944.
6. **Басевич, В.Я.** Механизмы окисления и горения нормальных парафиновых углеводородов: переход от C_1-C_{10} к $C_{11}-C_{16}$ / В.Я. Басевич и др. // Химическая физика. – Т. 32. – № 4. – С. 1-10.
7. **Шишков, В.А.** Алгоритм определения угла опережения зажигания при переключении с бензина на газ для контроллера электронной системы управления двигателем // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 13. – №4. – 2011. – С. 235-240.
8. **Селиванов, С.Е.** Кинетика испарения капель жидких топлив / С.Е. Селиванов, М.И. Кулик // Вестник ХНАДУ. – Вып. 52. – 2011. – С. 105-109.
9. **Кутовой, В.А.** Впрыск топлива в дизелях / В.А. Кутовой. – М.: Машиностроение, 1981. – 120 с.
10. **Плотников, С.А.** Анализ процесса сгорания генераторного газа и его смеси с бензином в поршневом двигателе / С.А. Плотников, А.С. Зубакин // Двигателестроение. – 2018. – № 3. – С. 14-18.

*Дата поступления
в редакцию: 10.04.2019*

S.A. Plotnikov¹, P.Y. Kantor¹, A.S. Zubakin¹, M.N. Vtyurina²

ABOUT SOME FEATURES OF WORK OF THE ENGINE ON GENERATING GAS

Vyatka state University¹
Vyatka state agricultural academy²

Object of research is the fuel mix consisting of gasoline and generating gas. Research problems were theoretical calculations of time of combustion of a mix of gasoline with generating gas.

The purpose was research of influence of molecular structure of combustible components on character of process of their combustion.

Methods of the present{true} researches were theoretical calculations and the system analysis.

Carried out researches and their analysis have allowed to define{determine} optimum values of a corner of an advancing of ignition of the spark engine.

Key words: generator gas, gasoline, ignition, engine, combustion process, toxic components.