

DOI 10.15589/jnn20150209

УДК 621.431

М67

**INFLUENCE OF THE SYNTHESIS GAS ADDITIVE ON THE RATE OF PRESSURE RISE DURING COMBUSTION****ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ СИНТЕЗ-ГАЗА НА СКОРОСТЬ НАРАСТАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИ СГОРАНИИ****Oleksandr S. Mytrofanov**

m.aleksandr.s@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7704-4026

**Andrii S. Poznanskyi**

andreypoznansky@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4351-7504

**Arkadii Yu. Proskurin**

arkadii.proskurin@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-5225-6767

**А. С. Митрофанов,**

канд. техн. наук, доц.

**А. С. Познанский,**

ассист.

**А. Ю. Проскурин**

ассист.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

**Abstract.** The influence of the synthesis gas additive on the rate of pressure rise during combustion has been considered. The aim of the research is the study of the operation parameters of the engine with spark ignition using the synthesis gas additives to petrol. The performance of the engine with spark ignition and external mixture formation running on petrol with synthesis gas additives is experimentally studied. The experimental indicator diagrams, as well as the dependences of the rate of pressure rise at different synthesis gas additives are obtained. The influence of the synthesis gas additive on the indicator engine performance is shown. The research results can be used to develop recommendations for the design of engines running on the petrol with synthesis gas additives. The determined regularities allow using the synthesis gas as an additive to petrol.

**Keywords:** synthesis gas; indicator diagram; internal combustion engine; workflow parameters; engine operation rigidity.

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований работы двигателя с искровым зажиганием и внешним смесеобразованием при работе на бензине с добавками синтез-газа. Получены экспериментальные индикаторные диаграммы, а также зависимости скорости нарастания давления при разных добавках синтез-газа. Показано влияние добавки синтез-газа на индикаторную работу двигателя.

**Ключевые слова:** синтез-газ; индикаторная диаграмма; двигатель внутреннего сгорания; параметры рабочего процесса; жесткость работы двигателя.

**Анотація.** Наведено результати експериментальних досліджень роботи двигуна з іскровим запалюванням і зовнішнім сумішоутворенням при роботі на бензині з додаванням синтез-газу. Отримано експериментальні індикаторні діаграми, а також залежності швидкості наростання тиску за різних додавань синтез-газу. Показано вплив додавань синтез-газу на індикаторну роботу двигуна.

**Ключові слова:** синтез-газ; індикаторна діаграма; двигун внутрішнього згорання; параметри робочого процесу; жорсткість роботи двигуна.

**REFERENCES**

- [1] Danilov A. M., Kaminskiy E. F., Khavkin V. A. Alternativnye topliva: dostoinstva i nedostatki. Problemy primeneniya [Alternative fuels: advantages and disadvantages. Problems of application]. *Ros. khimicheskij zhurnal ob-va im. D.I. Mendeleeva — Russian Journal of General Chemical*, 2003, vol. 47, no. 6, pp. 4–11.
- [2] Vyubov D. N., Ivashchenko N. A., Ivin V. I. et al. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Teoriya porshnevnykh i kombinirovannykh dvigateley* [Internal combustion engines: Theory of piston and combined engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 372 p.

- [3] Kamenev V.F., Fomin V.M., Khripach N.A. Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya raboty dvigatelya na dizelno-vodorodnykh toplivnykh kompozitsiyakh [Theoretical and experimental studies of the performance of an engine running on diesel-hydrogen fuel compositions] *Alternativnaya energetika i ekologiya — Alternative Energy and Ecology*, 2005, no. 7, issue 27, pp. 32–42.
- [4] Shkalova V.P. *Primenenie netraditsionnykh topliv v dizelyakh* [Use of unconventional fuels in diesel engines]. Moscow, NIAD Publ., 1986. 85 p.
- [5] Azimov U., Tomita E., Kawahara N. *Combustion and Exhaust Emission Characteristics of Diesel Micro-Pilot Ignited Dual-Fuel Engine*. Diesel Engine — Combustion, Emissions and Condition Monitoring; [ed. by B. Saiful]. Chapter 2, April 30, 2013.
- [6] Santoso W.B., Nur A., Ariyono S., Bakar R.A. Combustion characteristics of a diesel-hydrogen dual fuel engine. *National Conference in Mechanical Engineering Research and Postgraduate Studies (2nd NCMER 2010), (3.12–4.12.2010)*. Faculty of Mechanical Engineering, UMP Pekan, Kuantan, Pahang. Malaysia, pp. 23–32.
- [7] Saravanan N., Nagarajan G., Dhanasekaran C., Kalaiselvan K.M. Experimental Investigation of Hydrogen Fuel Injection in DI Dual Fuel Diesel Engine. *SAE Technical Paper Series*, 2007, 2007-01-1465.
- [8] Shudo T., Tsuga K., Nakajima Y. Combustion Characteristics of H<sub>2</sub>–CO–CO<sub>2</sub> Mixture in an IC Engine. *SAE Technical Paper Series*, 2001, 5–8 March, pp. 105–115.
- [9] Shudo T., Takahashi T. Influence of Reformed Gas Composition on HCCI Combustion of Onboard Methanol-Reformed Gases. *SAE Technical Paper Series*, 2004, 8–10 June, pp. 23–31.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В современном двигателестроении особое внимание уделяется исследованию использования альтернативных видов топлива, полученных из возобновляемого сырья. Одним из перспективных видов топлива является синтез-газ. В своем составе синтез-газ имеет значительное количество водорода, что и обуславливает особенности его применения в двигателях. Применение синтез-газа, как и чистого водорода, в качестве топлива приводит к некоторому снижению мощности конвертированного двигателя (в большей степени это связано с низкой плотностью синтез-газа), что не всегда приемлемо для потребителя. Решить эту проблему можно путем частичной замены нефтяного топлива добавками синтез-газа на больших нагрузках работы двигателя, при малых же — полной замены на синтез-газ. Добавки синтез-газа, безусловно, оказывают свое влияние на рабочий процесс двигателя в целом и на скорость нарастания давления (жесткость работы двигателя) в частности.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В связи с достаточно широкой сырьевой базой синтез-газ вызывает большой интерес в качестве альтернативного топлива для ДВС [1, 4]. Преимущественно синтез-газ представляет собой смесь двух горючих газов — СО и Н<sub>2</sub>, однако в зависимости от условий получения применяемого сырья в его состав может входить и ряд других компонентов: например, СН<sub>4</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>4</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub>. Именно состав и определяет отличительные особенности протекания и организации рабочего цикла ДВС. Поэтому многими отечественными и зарубежными учеными уделяется значительное внимание влиянию альтернативного топлива как

в чистом виде, так и в качестве добавок на параметры рабочего процесса ДВС в области экспериментальных исследований [3, 5–9].

В результате изучения отечественной и зарубежной литературы не удалось обнаружить достаточно надежных экспериментальных и теоретических данных об особенностях протекания и организации рабочего цикла двигателей, работающих с добавками синтез-газа.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** — исследовать параметры работы двигателя с искровым зажиганием, а также особенности процесса сгорания при использовании добавок синтез-газа к бензину.

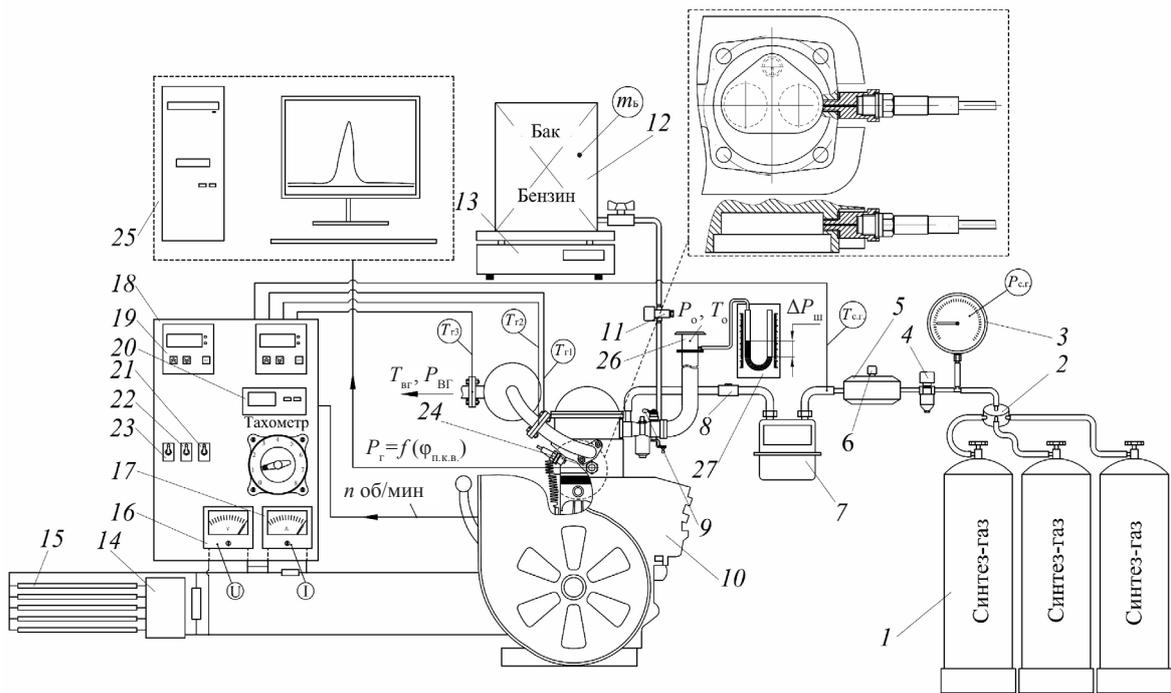
### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Одним из методов исследования рабочего процесса ДВС при работе с добавками синтез-газа является физическое моделирование, которое позволяет получить достаточно точные результаты.

Исследования рабочего процесса были проведены на экспериментальной установке с двигателем 2Ч 7,2/6 (рис. 1).

Основные параметры двигателя с внешним смесеобразованием, работающего на трехфазный генератор переменного тока, представлены в таблице.

В ходе экспериментов определены индикаторные диаграммы, а также исследованы процессы смесеобразования и сгорания смеси паров бензина и синтез-газа в цилиндре двигателя. Используемый для работы двигателя синтез-газ был получен путем термохимической паровой конверсии биоэтанола. Основными компонентами синтез-газа были водород Н<sub>2</sub> (43%), окись углерода СО (34%) и метан СН<sub>4</sub> (23%). Расчетная удельная теплота сгорания синтез-газа составила 28,79 МДж/кг, а плотность — 0,63 кг/м<sup>3</sup>.



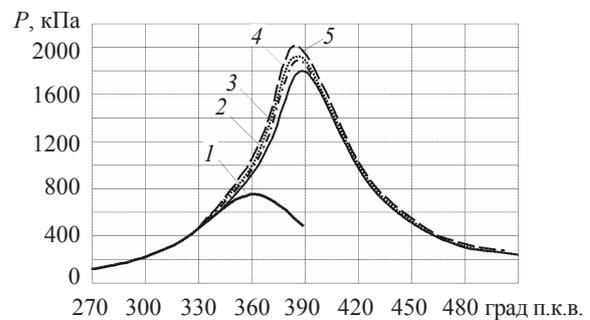
**Рис. 1.** Экспериментальная установка на базе двигателя с искровым зажиганием 2Ч 7,2/6: 1 — баллоны с синтез-газом, 2 — общий ресивер, 3 — манометр, 4 — электромагнитный газовый клапан с фильтром, 5 — редуктор низкого давления, 6 — электромагнитный клапан; 7 — газовый счетчик, 8 — регулятор качества смесеобразования, 9 — дроссельная заслонка, 10 — двигатель с искровым зажиганием 2Ч 7,2/6; 11 — электромагнитный бензиновый клапан, 12 — бак с топливом, 13 — весы, 14 — система управления нагрузкой, 15 — блок ТЭНов, 16 — вольтметр, 17 — амперметр, 18 — панель приборов, 19 — прибор 2ТРМ1, 20 — тахометр, 21 — тумблер включения бензинового электромагнитного клапана, 22 — тумблер включения электромагнитного газового клапана, 23 — тумблер включения электромагнитного газового пускового клапана, 24 — датчик давления, 25 — персональный компьютер, 26 — расходомерная шайба, 27 — U-образный манометр

**Таблица 1.** Основные параметры двигателя УД-25 (2Ч 7,2/6) с внешним смесеобразованием

№ п.п.	Параметры	Размерность	Значение
1	Количество цилиндров	—	2
2	Рабочий объем цилиндров	см <sup>3</sup>	490
3	Диаметр цилиндра	мм	72
4	Ход поршня	мм	60
5	Степень сжатия	—	6
6	Частота вращения коленчатого вала	об/мин	3000
7	Эффективная мощность	кВт	5,88
8	Удельный эффективный расход топлива	кг/(кВт·ч)	0,435

На рис. 2 представлены экспериментальные индикаторные диаграммы при работе двигателя 2Ч 7,2/6 по нагрузочной характеристике с добавками синтез-газа 28...64% по массе. Мощность двигателя при этом составляла 3 кВт, частота вращения коленчатого вала — 3000 об/мин. При добавках синтез-газа к бензину коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  лежал в пределах 1,10...1,15.

Обработка индикаторных диаграмм позволила установить влияние добавки синтез-газа на изменение индикаторных показателей работы двигателя. Среднее индикаторное давление при работе на бензине равнялось 345,7 кПа, а с добавками синтез-газа 64% — 363,5 кПа, что на 5,16% выше. В зависимости



**Рис. 2.** Индикаторная диаграмма двигателя 2Ч 7,2/6 при разных добавках синтез-газа к бензину: 1 — линия сжатия без сгорания; 2 — бензин; 3, 4, 5 — добавка синтез-газа 28%, 32%, 64% соответственно

от добавки синтез-газа снижение удельного индикаторного расхода топлива составило 3...17%.

Анализ экспериментальных индикаторных диаграмм показал, что содержание в топливной смеси синтез-газа в пределах 28...64% по массе приводит к увеличению максимального давления сгорания на 211 кПа и смещению его в сторону ВМТ на 7° п. к. в. На рис. 3 представлено изменение максимального давления сгорания в зависимости от содержания синтез-газа в топливовоздушной смеси.

Также наблюдается и увеличение скорости нарастания давления  $dp/d\phi$  (рис. 4), что негативно влияет на работу двигателя. Ряд исследователей [6] прямо указывает на экспериментальное подтверждение непосредственной связи жесткости рабочего цикла двигателя с надежностью и шумностью его работы. Жесткая работа двигателя, сопровождающаяся высокими значениями максимального давления сгорания, не допустима при эксплуатации ДВС, поскольку приводит к увеличению динамической нагрузки деталей кривошипно-шатунного механизма, а также разрушению подшипников. Именно поэтому при работе двигателя на бензине с добавками синтез-газа необходимо учитывать влияние ряда параметров, таких как коэффициент избытка воздуха, угол опережения зажигания, степень сжатия, коэффициент наполнения цилиндра, фазы газораспределения, способ смешения (внешнее, внутреннее).

Снижения жесткости работы двигателя можно добиться путем увеличения коэффициента избытка воздуха, а также изменения угла опережения зажигания.

В ходе анализа экспериментальных данных в процессе сгорания смеси паров бензина с синтез-газом согласно общепринятому делению [2] было выделено три фазы сгорания.

Первая фаза сгорания — образование начального очага пламени от электрической искры и развитие турбулентного фронта пламени, то есть момент

от образования искры до начала резкого повышения давления в цилиндре при работе с добавками синтез-газа, — составляет примерно 12° п. к. в., что на 6° п. к. в. меньше, чем на бензине.

Вторая фаза сгорания — фаза быстрого сгорания, при которой фронт пламени распространяется в большей части пространства камеры сгорания, достигает стенок цилиндра и заканчивается при достижении максимального давления сгорания, — составляет примерно 28° п. к. в.

Третья фаза — догорание — составляет порядка 8° п. к. в. В третьей фазе происходит догорание продуктов неполного окисления топлива за фронтом пламени и в пристенном слое, в зазорах между поршнем и головкой цилиндра, а также рекомбинация молекул. Одним из признаков окончания горения топлива принято равенство скорости выделения теплоты и скорости теплоотдачи в стенки (квазиadiaбатическая точка процесса) [2].

**ВЫВОДЫ.** 1. При использовании добавок синтез-газа к бензину (28...64%) наблюдаются увеличение максимального давления сгорания на 211 кПа и смещение его в сторону ВМТ на 7° п. к. в., а также жесткость работы при мощности двигателя 3 кВт и частоте вращения коленчатого вала 3000 об/мин. Снижения жесткости работы двигателя можно добиться путем увеличения коэффициента избытка воздуха до 1,5, а также уменьшения угла опережения зажигания.

2. В зависимости от добавки синтез-газа к бензину индикаторные показатели работы двигателя значительно улучшаются. Так, среднее индикаторное давление увеличивается на 5,16%, а удельный индикаторный расход топлива снижается на 3...17%.

3. Добавка синтез-газа к бензину уменьшает общую продолжительность сгорания смеси. Продолжительность первой фазы сгорания смеси составляет порядка 12° п. к. в., второй — примерно 28° п. к. в., а третьей — 8° п. к. в.

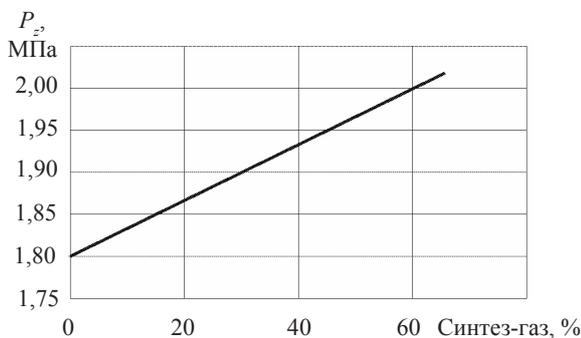


Рис. 3. Влияние добавок синтез-газа на максимальное давление сгорания

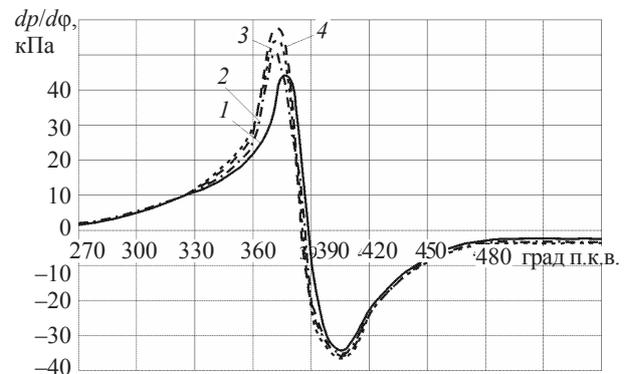


Рис. 4. Изменение скорости нарастания давления в зависимости от разных добавок синтез-газа: 1 — бензин; 2, 3, 4 — добавка синтез-газа 28%, 32%, 64% соответственно

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Данилов, А. М.** Альтернативные топлива: достоинства и недостатки. Проблемы применения [Текст] / А. М. Данилов, Э. Ф. Каминский, В. А. Хавкин // Рос. химический журнал об-ва им. Д. И. Менделеева. — 2003. — Т. 47, №6. — С. 4–11.
- [2] Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей [Текст] : учеб. для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». — 4-е изд., перераб. и доп. / Д. Н. Вырубов, Н. А. Иващенко, В. И. Ивин и др. ; под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. — М. : Машиностроение, 1983. — 372 с.
- [3] **Каменев, В. Ф.** Теоретические и экспериментальные исследования работы двигателя на дизельно-водородных топливных композициях [Текст] / В. Ф. Каменев, В. М. Фомин, Н. А. Хрипач // Альтернативная энергетика и экология. — 2005. — №7 (27). — С. 32–42.
- [4] **Шкалова, В. П.** Применение нетрадиционных топлив в дизелях [Текст] / В. П. Шкалова. — М. : НИИД, 1986. — 85 с.
- [5] **Azimov, U.** Combustion and Exhaust Emission Characteristics of Diesel Micro-Pilot Ignited Dual-Fuel Engine [Text] / U. Azimov, E. Tomita, N. Kawahara // Diesel Engine — Combustion, Emissions and Condition Monitoring; ed. by B. Saiful. — Chapter 2. — April 30, 2013.
- [6] Combustion characteristics of a diesel-hydrogen dual fuel engine [Text] / W.B. Santoso, A. Nur, S. Ariyono, R.A. Bakar // National Conference in Mechanical Engineering Research and Postgraduate Studies (2nd NCMER 2010). — 3–4 December 2010 / Faculty of Mechanical Engineering, UMP Pekan, Kuantan, Pahang. — Malaysia. — P. 23–32.
- [7] Experimental Investigation of Hydrogen Fuel Injection in DI Dual Fuel Diesel Engine [Text] / N. Saravanan, G. Nagarajan, C. Dhanasekaran, K. M. Kalaiselvan // SAE Technical Paper Series. — 2007. — 2007-01-1465.
- [8] **Shudo, T.** Combustion Characteristics of H<sub>2</sub>-CO-CO<sub>2</sub> Mixture in an IC Engine [Text] / T. Shudo, K. Tsuga, Y. Nakajima // SAE Technical Paper Series. — 2001. — 5–8 March. — P. 105–115.
- [9] **Shudo, T.** Influence of Reformed Gas Composition on HCCI Combustion of Onboard Methanol-Reformed Gases [Text] / T. Shudo, T. Takahashi // SAE Technical Paper Series. — 2004. — 8–10 June. — P. 23–31.

---

© О. С. Митрофанов, А. С. Познанський, А. Ю. Проскурін

Надійшла до редколегії 04.02.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. С. І. Сербін