

Научная статья  
УДК 621.43.057

## Влияние добавок водорода на показатели двигателя, работающего на сжиженном углеводородном газе

Дмитрий Николаевич Илюшин<sup>1</sup>, Евгений Александрович Салыкин<sup>2</sup>,  
Эмин Гамза-оглы Сафаров<sup>3</sup>, Евгений Алексеевич Федянов<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ), Волгоград, Россия

<sup>1,2,3</sup>tig@vstu.ru

<sup>4</sup>fedyanov@vstu.ru

**Аннотация.** Экспериментально исследовано влияние малых добавок свободного водорода на топливную экономичность и экологические характеристики автомобильного двигателя, работающего на сжиженном углеводородном газе. Двигатель ВАЗ-11194, установленный на испытательном стенде, был оснащен газобаллонным оборудованием с распределенным впрыском сжиженного газа в ветви впускного коллектора. Водород подавался во впускной тракт двигателя перед воздушным фильтром. Влияние добавок водорода на протекание процесса сгорания проанализировано на основе данных индицирования, выполненного с помощью датчиков-свечей фирмы Кистлер. Содержание оксида углерода и несгоревших углеводородов в отработавших газах измерялось газоанализатором АСКОН-02.

Проведенные опыты показали, что так же как в двигателях, работающих на бензине или природном газе, малые добавки водорода слабо влияют на расход топлива и приводят главным образом к снижению выбросов токсичных компонентов с продуктами сгорания. Наиболее существенно добавки водорода влияют на содержание в отработавших газах двигателя оксида углерода. Наличие в топливовоздушной смеси свободного водорода, обладающего высокой химической активностью, отражается на кинетике химических реакций, протекающих при горении топлива, в том числе на кинетике реакций диссоциации. Снижение при добавке свободного водорода концентрации в продуктах сгорания несгоревших углеводородов связано, в значительной мере, с уменьшением в камере сгорания двигателя объема зон гашения пламени.

**Ключевые слова:** сжиженный углеводородный газ, пропан-бутан, добавки водорода, токсичность отработавших газов.

**Для цитирования:** Илюшин Д.Н., Салыкин Е.А., Сафаров Э.Г., Федянов Е.А. Влияние добавок водорода на показатели двигателя, работающего на сжиженном углеводородном газе // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №1(35).

Original article

## The effect of hydrogen additives on the performance of an engine running on liquefied petroleum gas

Dmitriy N. Ilyushin<sup>1</sup>, Evgeniy A. Salykin<sup>2</sup>, Emin G. Safarov<sup>3</sup>, Evgeniy A. Fedyanov<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Volgograd State Technical University (VSTU), Volgograd, Russia

<sup>1,2,3</sup>tig@vstu.ru

<sup>4</sup>fedyanov@vstu.ru

**Abstract.** The effect of small additions of free hydrogen on the fuel efficiency and environmental characteristics of an automobile engine running on liquefied hydrocarbon gas has been experimentally studied. The VAZ-11194 engine, installed on the test bench, was equipped with gas-balloon equipment with distributed injection of liquefied gas into the intake manifold branch. Hydrogen was supplied to the engine intake tract in front of the air filter. The influence of hydrogen additions on the course of the combustion process is analyzed on the basis of indexing data performed using Kistler candle sensors. The content of carbon monoxide and unburned hydrocarbons in the exhaust gases was measured with an ASCON-02 gas analyzer. Experiments have shown that, just as in engines running on gasoline or natural gas, small additions of hydrogen have little effect on fuel consumption and lead mainly to a reduction in emissions of toxic components with combustion products. Hydrogen additives most significantly affect the content of carbon monoxide in the exhaust gases of an engine. The presence of free hydrogen in the air-fuel mixture, which has a high chemical activity, is reflected in the kinetics of chemical reactions occurring during fuel combustion, including the kinetics of dissociation reactions. The decrease in the concentration of unburned hydrocarbons in the combustion products with the addition of free hydrogen is associated, to a large extent, with a decrease in the volume of flame extinguishing zones in the combustion chamber of the engine.

**Keywords:** liquefied hydrocarbon gas, propane-butane, hydrogen additives, exhaust gas toxicity.

**For citation:** Ilyushin D.N., Salykin E.A., Safarov E.G., Fedyanov E.A. The effect of hydrogen additives on the performance of an engine running on liquefied petroleum gas. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №1 (35).

### Введение

Как свидетельствуют эксперименты, проведенные на поршневых [1, 2, 3, 4] и роторно-поршневых [5, 6] ДВС с принудительным зажиганием, даже относительно небольшие добавки свободного водорода или содержащего

свободный водород синтез-газа оказывают заметное положительное влияние на протекание процесса сгорания: сокращается продолжительность сгорания, повышается предел обеднения, уменьшаются выбросы несгоревших углеводородов и оксида углерода.

Интерес к применению добавок свободного водорода для интенсификации процесса сгорания обусловлен тем, что относительно небольшие количества свободного водорода можно генерировать непосредственно на борту транспортного средства, конвертируя в содержащий свободный водород синтез-газ основное углеводородное топливо [7, 8]. В последнем случае появляется возможность использовать для генерации синтез-газа теплоту отработавших газов двигателя и, тем самым, осуществлять термохимическую рекуперацию части этой теплоты.

При генерации синтез-газа на борту транспортного средства из основного углеводородного топлива, на котором работает двигатель, удается получать лишь небольшие, по сравнению с массой основного топлива, добавки свободного водорода. Так, например, в экспериментах, проведенных на автомобиле "Соболь" [9], двигатель которого работал на природном газе, в синтез-газ конвертировалось от 5 до 10% массового расхода природного газа. При этом массовая доля водорода в синтез-газе составляла лишь 2,5%. Относительно расхода природного газа добавка водорода не превышала по массе 0,55%. Такая малая добавка водорода оказала, тем не менее, заметное влияние на показатели двигателя, в первую очередь на выбросы токсичных компонентов с отработавшими газами.

Существенное влияние малых, не превышающих 5%, добавок водорода на показатели автомобильного двигателя, работавшего на бензине, отмечено Л. Н. Бортниковым [3], а также в ходе исследований, проведенных в ВолгГТУ [10]. В последнем случае небольшое количество водорода поступало в камеру сгорания двигателя непосредственно перед образованием электрической искры по каналу, выполненному в свече зажигания. При

таком способе подачи водород обогащал в основном топливовоздушную смесь около электродов.

В большинстве проведенных исследований влияния добавок свободного водорода, в том числе в составе синтез-газа, на топливную экономичность и экологические показатели двигателей с принудительным зажиганием основным топливом был бензин или природный газ.

Представляет интерес оценить степень влияния добавок водорода в двигателях, работающих на сжиженном углеводородном газе.

### **Методика проведения эксперимента**

Эксперименты по определению влияния малых добавок свободного водорода на показатели автомобильного двигателя, работающего на пропан-бутане, были проведены нами на двигателе ВАЗ-11194, установленном на испытательном стенде. Двигатель был оснащен газовой аппаратурой 4-го поколения с распределенной подачей газа по ветвям впускного коллектора. Водород из баллона подавался по отдельной магистрали на впуск двигателя перед воздушным фильтром.

Оборудование стенда позволяло измерять все основные показатели двигателя, определять содержание оксида углерода и несгоревших углеводородов в отработавших газах, измерять их температуру, проводить индицирование всех цилиндров двигателя. Для индицирования использовали комплект датчиков-свечей 2614СК1 фирмы Kistler. Сигнал от датчиков-свечей обрабатывался с помощью программного комплекса PowerGraph. Двигатель в процессе испытаний мог работать как со штатной системой управления углами опережения зажигания, так и с системой управления, в которой значения углов можно было задавать и изменять непосредственно в ходе испытаний.

Используемый в рассматриваемых экспериментах водород марки «А» по ГОСТ 3022-80 получали с помощью водородного генератора ГВ-ВЧ-12

электролизом воды. Максимальное давление в баллоне, в котором находился запас водорода, равнялось 4 барам.

Для дозирования водорода использовался ротаметр ЭМИС-МЕТА 211-Р, который был специально тарирован для измерения расхода этого газа.

Испытания были проведены на режиме с 60% нагрузкой на частоте вращения коленчатого вала 2000 мин<sup>-1</sup>. при постоянном положении дроссельной заслонки. Расход воздуха на этом режиме составлял 70 кг/ч. Измерение показателей двигателя были проведены при трех значениях угла опережения зажигания: 19, 17 и 15 град. ПКВ.

Состав топливовоздушной смеси как с подачей водорода, так и без нее поддерживался системой управления стехиометрическим. При этом в силу большего, по сравнению с пропан-бутаном, значения теоретически необходимого количества воздуха, требуемого для сжигания водорода, система управления уменьшала массовую подачу основного газового топлива примерно на 1,25 %.

### **Оценка результатов эксперимента**

Эксперименты показали, что, также как в двигателях, работающих на бензине и на природном газе, малые добавки водорода к пропан-бутану влияют главным образом на содержание в продуктах сгорания токсичных компонентов. Как видно из графиков, приведенных на рис. 1, добавка 1% свободного водорода к пропан-бутану приводит к снижению содержания оксида углерода в продуктах сгорания примерно на 45%. При этом степень влияния добавки водорода практически не зависит от угла опережения зажигания.

Наблюдаемое значительное снижение концентрации оксида углерода в отработавших газах вследствие указанной выше малой добавки свободного водорода не может быть объяснено некоторым уменьшением доли углерода в смесевом топливе. Добавка 1% по массе от смесевого топлива свободного

водорода даже в случае работы двигателя на чистом пропане, снижает массовую долю углерода в смесевом топливе не более чем на 1%.

Основной причиной образования оксида углерода при указанных условиях работы двигателя является диссоциация диоксида углерода. Это подтверждается, в частности, характером изменения содержания оксида углерода в продуктах сгорания при уменьшении угла опережения зажигания. Снижение среднеинтегральной температуры в процессе сгорания вследствие уменьшения угла опережения зажигания приводит к соответствующему падению скорости реакции диссоциации диоксида углерода. По нашему мнению добавки свободного водорода, обладающего высокой химической активностью, влияют на кинетику всего комплекса элементарных реакций, протекающих при горении углеводородного топлива, и соответственно на скорость обратных реакций диссоциации.

Влияние добавок свободного водорода на содержание в продуктах сгорания несгоревших углеводородов не столь существенно, как на содержание оксида углерода (рис. 2). В исследованном диапазоне изменения угла опережения зажигания снижение концентрации несгоревших углеводородов в результате добавки свободного водорода не превышает 20%. Основной причиной снижения содержания несгоревших углеводородов в продуктах сгорания является, по нашему мнению, уменьшение вследствие присутствия в топливовоздушной смеси свободного водорода объема зон гашения пламени на стенках камеры сгорания и в заземленных объемах.

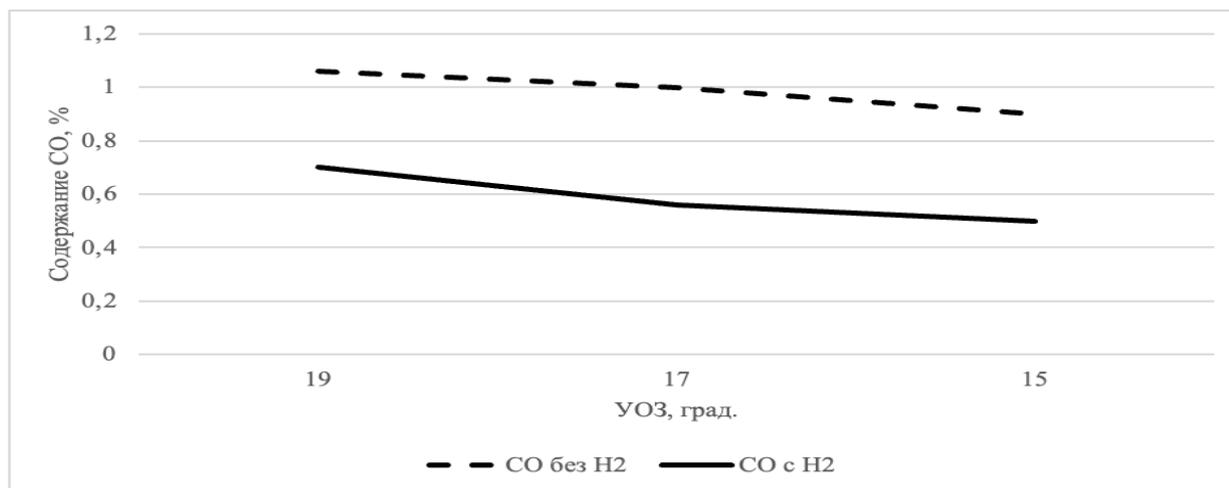


Рис. 1. Влияние добавок водорода и регулировки УОЗ на содержание СО в ОГ

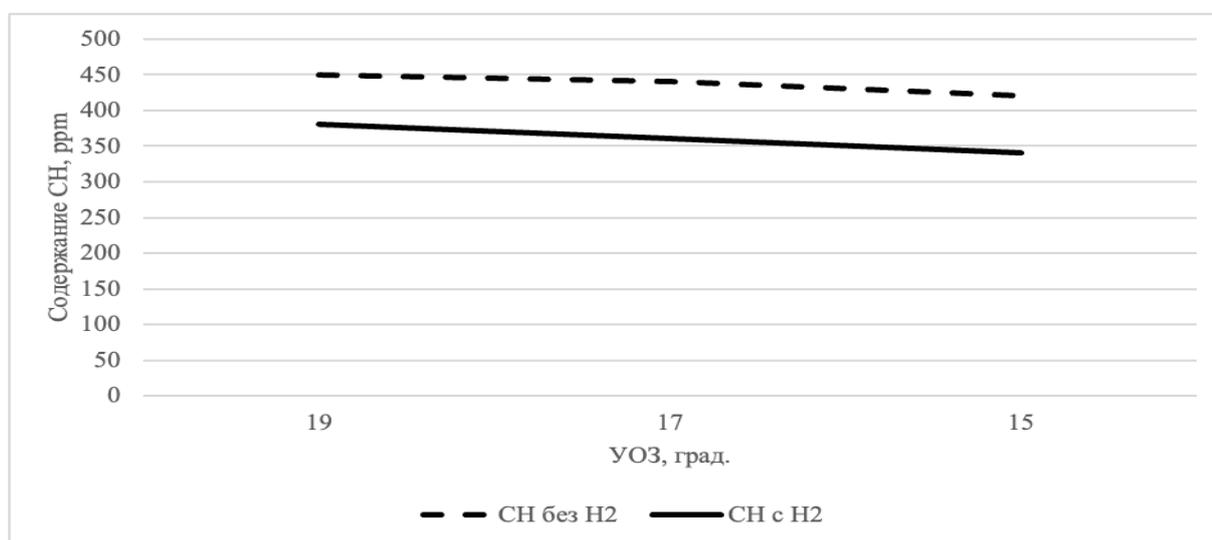


Рис. 2. Влияние добавок водорода и регулировки УОЗ на содержание СН в ОГ

## Заключение

Малые добавки свободного водорода к топливовоздушной смеси в двигателях, работающих на сжиженном углеводородном газе, влияют главным образом на содержание токсичных компонентов в продуктах сгорания. Это влияние, как можно обоснованно предполагать, обусловлено высокой химической активностью свободного водорода. При его наличии в топливовоздушной смеси меняется кинетика химических реакций, протекающих при горении топлива, уменьшаются объемы пристеночных и заземленных зон, в которых происходит гашение пламени.

Добиться заметного улучшения топливной экономичности за счет малых добавок водорода можно лишь при условии, что водород генерируется в составе синтез-газа за счет использования части теплоты отработавших газов двигателя, т. е. при условии использования принципа термохимической регенерации теплоты.

### Список источников

1. Бортников, Л.Н. Активация горения углеводородных топлив водородом / Л.Н. Бортников, М.М. Русаков, Р.Э. Петров // Вектор науки ТГУ. – 2012. – №4. – С. 137–140.
2. Асоян, А.Р. Применение водорода в двигателях внутреннего сгорания / А.Р. Асоян, И.К. Данилов, И.А. Асоян, Г.М. Полищук // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – № 21 (1). – С. 14–19.
3. Бортников, Л.Н. Особенности горения бензоводородовоздушной смеси в цилиндре поршневого двигателя внутреннего сгорания и определение оптимального соотношения бензин-водород / Л.Н. Бортников // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т. 43. – №. 4. – С. 8–14.
4. Пилипенко, С.О. Обзор зарубежных исследований по использованию водорода в качестве экологически чистого топлива в двигателях внутреннего сгорания / С.О Пилипенко // Проблемы машиностроения. – 2015. – Т. 181. – № 1. – С. 73–78.
5. Федянов, Е.А. Влияние добавок свободного водорода на экологические показатели роторно-поршневого двигателя / Е.А. Федянов, Ю.В. Левин, С.Н. Шумский, Е.А. Захаров // Двигателестроение. – 2018. – № 2 (272). – С. 35–38.
6. An experimental investigation of hydrogen-enriched gasoline in a Wankel rotary engine / F. Amrouche, P. Erickson, J. Park, S. Varnhagen // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – Т. 39 – P. 8525–8534.
7. Бахмутов, С.В. Термохимическая регенерация энергии отработавших газов автомобильного двигателя / С.В. Бахмутов, В.М. Фомин, Д.В. Аппелинский // Известия МГТУ «МАМИ». – 2012. – №14 (403). – С. 38–46.
8. Кирилов, В.А. Термохимическое преобразование топлив в водородсодержащий газ за счет рекуперированного тепла двигателей внутреннего сгорания / В.А. Кирилов, А.Б. Шигаров, Н.А. Кузин // Теоретические основы химической технологии. – 2013. – №5 (47). – С. 503–517.
9. Kirillov V., Sobyenin V., Kuzin N. Synthesis gas generation on-board a vehicle: Development and results of testing. – International journal of hydrogen energy, 2012.– №37.
10. Захаров, Е.А. Интенсификация процессов воспламенения и сгорания смеси при их искровом зажигании: монография / Е.А. Захаров В.З. Гибадуллин, Е.А. Федянов, С.Н. Шумский. – Волгоград, 2017. – 206 с.

### References

1. Bortnikov LN., Rusakov M. M., Petrov R. J. *Vektor nauki TGU*, 2012, no. 4, pp. 137–140.

2. Asojan A.R., Danilov I.K., Asojan I.A., Polishhuk G.M. *Vestnik RUDN. Serija: Inzhenernye issledovaniya*, 2020, no. 21 (1), pp. 14–19.
3. Bortnikov L.N. *Fizika goreniya i vzryva*, 2007, vol. 43, no. 4, pp. 8–14.
4. Pilipenko S.O. *Problemy mashinostroeniya*, 2015, vol. 181, no. 1, pp. 73–78.
5. Fedyanov E.A., Levin J.V., Shumskiy S.N., Zaharov E.A. *Dvigatelsestroenie*, 2018, no. 2 (272), pp. 35–38.
6. Amrouche F., Erickson P., Park J., Varnhagen S. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, pp. 8525–8534.
7. Bahumutov S.V., Fomin V.M., Appelinskiy D.V. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2012, no. 14 (403), pp. 38–46.
8. Kirilov V.A., Shigarov A.B., Kuzin N.A. *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii*, 2013, no. 5 (47), pp. 503–517.
9. Kirillov V., Sobyenin V., Kuzin N. *International journal of hydrogen energy*, 2012, no. 37.
10. Zaharov, E.A., Gibadulin V.Z., Fedyanov E.A., Shumskiy S.N. *Intensifikacija processov vosplamneniya i sgoraniya smesi pri ih iskrovom zazhiganii* (Intensification of Ignition and Combustion of a Mixture during Their Spark Ignition), Volgograd, 2017, pp. 206.

*Статья опубликована по итогам международной научно-технической конференции «10-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса».*

Рецензент: М.Г. Шатров, д-р техн. наук, проф., МАДИ

### ***Информация об авторах***

**Илюшин Дмитрий Николаевич**, ст. преподаватель, ВолгГТУ.  
**Салыкин Евгений Александрович**, канд. техн. наук, доц., ВолгГТУ.  
**Сафаров Эмин Гамза-оглы**, аспирант, ВолгГТУ.  
**Федянов Евгений Алексеевич**, д-р техн. наук, проф., ВолгГТУ.

### ***Information about the authors***

**Ilyushin Dmitriy N.**, senior lecturer, VSTU.  
**Salykin Evgeniy A.**, Ph.D., Associate Professor, VSTU.  
**Safarov Emin G.**, postgraduate, VSTU.  
**Fedyanov Evgeniy A.**, Dr. Sc., professor, VSTU.

*Статья поступила в редакцию 28.02.2023; одобрена после рецензирования 01.03.2023; принята к публикации 21.03.2023.*

*The article was submitted 28.02.2023; approved after reviewing 01.03.2023; accepted for publication 21.03.2023.*