

Научная статья
УДК 621.43.05

Влияние бензоводородовоздушных смесей на рабочие процессы ДВС и энергетические показатели автотранспортных средств

Валерий Александрович Зенченко ¹, Владимир Николаевич Коноплёв ²,
Игорь Артурович Асоян ³

¹ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

^{2,3} Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия

¹ zvaeats@yandex.ru,

² konoplev-vn@rudn.ru

³ ig.asoyan@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается влияние бензоводородовоздушных смесей на рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и на энергетические показатели автотранспортных средств. Бензоводородовоздушные смеси, образованные при сочетании углеводородных топлив с атмосферным воздухом, играют ключевую роль в процессе горения, оказывая значительное воздействие на эффективность и экологичность работы ДВС. В работе анализируются механизмы формирования таких смесей, их свойства и факторы, влияющие на воспламеняемость и теплотворную способность. Особое внимание уделяется влиянию соотношения компонентов смеси на кинетику горения и формирование вредных выбросов. Представлены результаты исследований, показывающих, как изменение состава смеси может улучшать или ухудшать показатели мощности и экономичности двигателя. Выявлены оптимальные режимы работы для достижения максимальной энергетической производительности при минимизации негативного влияния на окружающую среду. Также в работе рассматриваются пути совершенствования системы управления смесью для улучшения рабочих параметров двигателя. Взаимосвязь между характеристиками бензоводородовоздушных смесей и развитием технологий топливной эффективности является важным аспектом в контексте растущих требований к экологической чистоте автотранспортных средств.

Ключевые слова: двигатели внутреннего сгорания, водород, бензоводородовоздушная смесь, комбинированная система питания ДВС, система хранения водорода

Для цитирования: Зенченко В.А., Коноплёв В.Н., Асоян И.А. Влияние бензоводородовоздушных смесей на рабочие процессы ДВС и энергетические показатели автотранспортных средств // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 2 (48).

Original article

Influence of benzohydrogen-air mixtures on internal combustion engine processes and on the energy performance of vehicles

Valery A. Zenchenko¹, Vladimir N. Konoplev², Igor A. Asoyan³

¹ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

^{2,3} Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

¹ zvaeats@yandex.ru,

² konoplev-vn@rudn.ru

³ ig.asoyan@yandex.ru

Abstract. The paper examines the influence of benzohydrogen-air mixtures on the operating processes of internal combustion engines (ICEs) and on the energy performance of motor vehicles. Benzohydrogen-air mixtures, formed by combining hydrocarbon fuels with atmospheric air, play a crucial role in the combustion process, significantly affecting the efficiency and environmental friendliness of ICEs. The paper analyzes the mechanisms of such mixtures formation, their properties, and the factors influencing their flammability and calorific value. Special attention is given to the influence of the mixture component ratio on the combustion kinetics and the formation of harmful emissions. The paper presents the results of studies showing how changing the mixture composition can improve or degrade the engine's power and efficiency. The optimal operating modes have been identified to achieve maximum energy performance while minimizing the negative impact on the environment. The paper also discusses ways to improve the mixture control system in order to improve the engine's performance. The relationship between the characteristics of gasoline-hydrogen-air mixtures and the development of fuel efficiency technologies is an important aspect in the context of the growing environmental requirements for vehicles.

Keywords: internal combustion engines, hydrogen, air-hydrogen-benzene mixture, combined internal combustion engine fuel system, hydrogen storage system

For citation: Zenchenko V.A., Konoplev V.N., Asoyan I.A. Influence of benzohydrogen-air mixtures on internal combustion engine processes and on the energy performance of vehicles. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura.* 2026. No. 2 (48).

Введение

С ростом количества автомобильного транспорта вопросы, связанные со снижением расхода топлива на нефтяной основе и уменьшением вредных выбросов в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания [3], становятся все более актуальными.

Одним из перспективных направлений решения указанных выше проблем является использование альтернативных видов газообразных топлив [4, 7], хотя уже и сейчас пропан и метан перешли в разряд классического топлива, а автопроизводители ПАО КАМАЗ, ПАО ГАЗ разрабатывают и выпускают двигатели, функционирующие на газу.

В настоящее время одним из наиболее перспективных видов топлива является водород. У водорода есть неоспоримые преимущества: экологичность, высокие энергетические показатели, уникальные кинетические характеристики и практически неограниченная сырьевая база. В тоже время использование водорода как основного топлива сопряжено с определенными трудностями [10]:

- для получения водорода применяются достаточно сложные и дорогостоящие технологии;
- необходимо использовать сложное оборудование для хранения водорода;
- отсутствует инфраструктура водородных заправочных станций.

Вышеописанные вопросы в совокупности являются сдерживающим фактором широкого использования водорода на транспорте.

В статье предложено техническое решение, которое позволяет снизить расход основного углеводородного топлива и улучшить технико-экономические и экологические показатели двигателя внутреннего сгорания (ДВС) за счёт добавления в топливовоздушную смесь эффективной массовой доли водорода.

Высокая скорость сгорания водородовоздушной смеси оказывает положительное влияние на повышение эффективности рабочего процесса [9]. Воспламенение водорода происходит в достаточно широких пределах концентрации в воздухе. Пределы воспламенения: для водорода $\alpha = 0,15–10$; для бензина $\alpha = 0,27–1,7$; для метана $\alpha = 0,65–2,0$. Низкий предел воспламенения делает возможной работу двигателя на различных режимах с широким изменением состава смеси. Техническим результатом является снижение расхода углеводородного топлива (нефтяного происхождения).

Целью исследования является оценка изменения (снижения) расхода основного топлива при добавлении водорода в бензиновоздушную смесь двигателя.

Научная новизна: получены аналитические зависимости подачи водорода в бензовоздушную смесь и изменения расхода топлива при различных скоростных режимах движения автомобиля.

Материал и методы исследования

Результаты испытаний автотранспортных средств на бензоводородовоздушных смесях показали целесообразность применения водорода в качестве добавки к бензину, т.к. энергопотребление сокращается на 2,4–5,6%, а замещение бензина составляет 8–17% в режиме имитации городского ездового цикла [8].

Особенности рабочего процесса ДВС, использующих водород, определяются свойствами бензоводородовоздушной смеси, пределами воспламенения, распространения фронта пламени, температурой и энергией воспламенения – все эти свойства у водорода лучше, чем у углеводородных топлив (таблица 1) [5].

Таблица 1

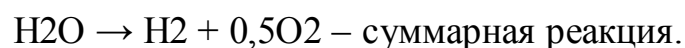
Основные показатели свойств бензина и водорода

Характеристики	Бензин	Водород	Преимущество водорода
Плотность топлива, кг/м ³	750	0,0899	(-)8.3
Минимальная энергия воспламенения, МДж	0,24	0,02	(+) 12.0
Нижшая теплотворная способность, МДж/кг	44	120	(+) 2.73
Стехиометрическое количество воздуха на 1 кг топлива, кг/кг	14,9	34,3	(+) 2.3
Максимальная ламинарная скорость сгорания, м/с	0,30	2,75	(+) 9.2
Коэффициент диффузии, см ² /с	0,06	0,63	(+) 10.5
Концентрационный предел распространения пламени, α	$\alpha_{\max} - 0,40;$ $\alpha_{\min} - 1,3$ диапазон 0.9	$\alpha_{\max} - 0,22;$ $\alpha_{\min} - 4,0$ диапазон 3.78	(+) 4.2

Анализ данных, представленных в таблице 1, выявляет ряд существенных преимуществ водорода по сравнению с бензином по ключевым физико-химическим и энергетическим параметрам.

В настоящей работе рассматривается возможность использования на борту транспортного средства добавки водорода, получаемого путем электролиза [2, 6] с использованием щелочного электролита (20–30% раствор KOH).

При подаче напряжения от внешнего источника постоянного тока на электроды и прохождении электрического тока через раствор на электродах возникает окислительно-восстановительная реакция, вследствие чего на катоде образуются пузырьки водорода, а на аноде – кислорода:



Далее выделившийся газ (газ Брауна) подается во впускной коллектор двигателя внутреннего сгорания (рисунок 1).

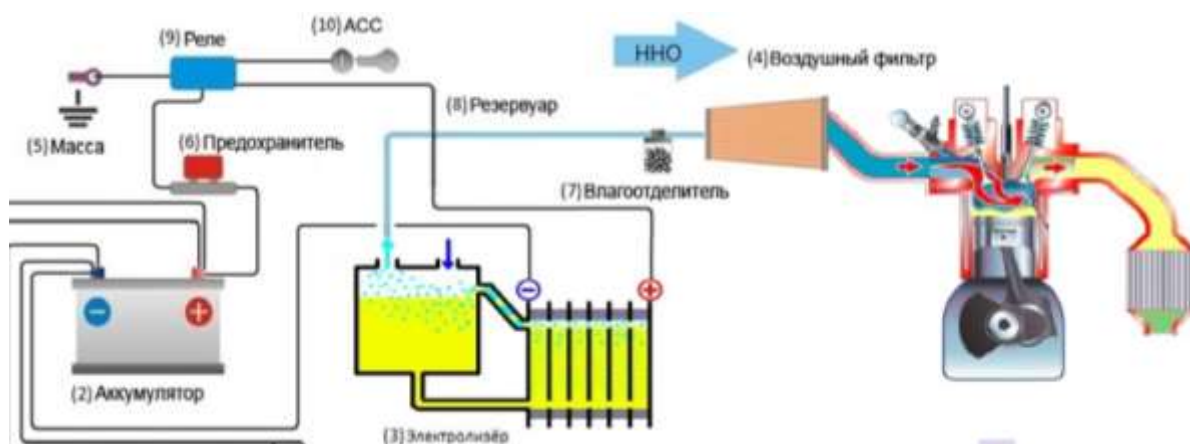


Рис. 1. Схема подключения электролизера и источников энергии

Рассматривая выделившийся газ как добавку к нефтяному топливу, возможно снизить затраты основного топлива и количество вредных выбросов в отработавших газах ДВС за счет полноты сгорания топливоздушная смеси.

Более высокая скорость сгорания топлива с добавкой водорода в бензо-воздушную смесь по сравнению с обычной смесью бензинового двигателя (в 1.5-2 раза) в совокупности с лучшей полнотой сгорания способствует повышению индикаторного КПД двигателя [6]. При этом в зависимости от

нагрузки Pe/Pe_{\max} и использования различных составов топлива (бензин или бензин + водород при смешанном качественном и количественном регулировании) в связи с ростом давления $P(z)$, принимающего значение $P(z')$, что отражено на рисунке 2, может быть обеспечен существенный рост индикаторного КПД η_i [6].

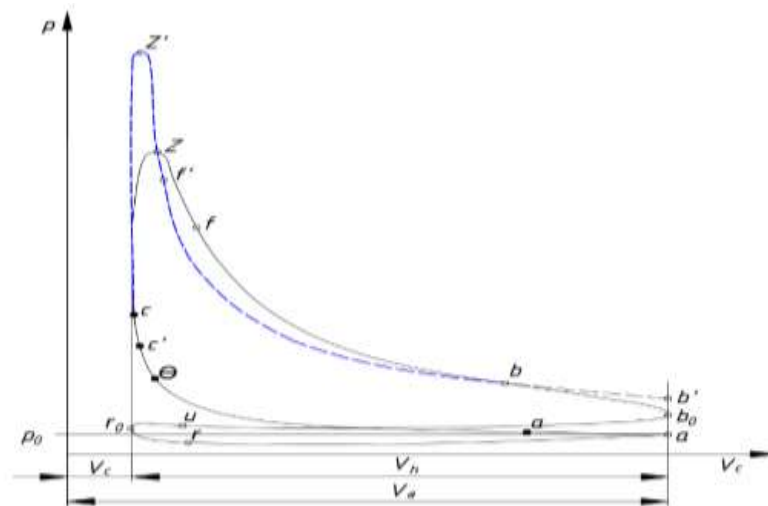


Рис. 2. Принципиальная схема индикаторной диаграммы бензинового двигателя и двигателя, работающего на бензоводородной смеси

где b, r – моменты открытия и закрытия выпускного клапана;

u, a – моменты открытия и закрытия впускного клапана;

θ – момент начала подачи топлива в цилиндр или искры в бензиновом двигателе;

z – момент достижения максимального давления газа (при использовании бензовоздушной смеси);

z' – момент достижения максимального давления газа (при использовании бензовоздушной смеси с добавкой водорода);

f – условный момент окончания сгорания для бензовоздушной смеси;

f' – условный момент окончания сгорания для бензовоздушной смеси с добавкой водорода.

В процессе исследований в качестве показателя ДВС, характеризующего топливную экономичность, принимался массовый метод – путем измерения расхода топлива (масса израсходованного топлива) за определенное время работы агрегата.

Оценка снижения расхода топлива на бензиноводородной смеси по сравнению с использованием чистого бензина (бензиновоздушная смесь) может быть определена из выражения (1) [8]:

$$\delta_{(Vi)} = \left(\frac{Q_{vб}}{Q_{vбв}} - 1 \right) * 100\%, \quad (1)$$

где δ_{Vi} – снижение расхода топлива при использовании бензиноводородной смеси по сравнению с бензиновоздушной, %;

$Q_{vб}$ – расход топлива на чистом бензине;

$Q_{vбв}$ – расход топлива на бензино-водородной смеси.

В процессе проведения испытания автомобиля KIA CEED 1.6 в диапазоне заданных скоростных режимов движения (40, 45, 50 км/ч) проведены измерения среднего расхода топлива на бензиновоздушной и бензиноводородной смесях. С целью получения более чувствительных характеристик расхода топлива нагрузка на стенде была увеличена по сравнению с движением автомобиля в установившемся режиме на дороге. В процессе измерений фиксировались средние значения расхода топлива на бензине $Q_{vб}$ и на бензиновоздушной смеси с добавлением 8% водорода $Q_{vбв}$, а также обороты двигателя на фиксируемых передачах автоматической коробки передач (АКПП).

При увеличении нагрузки на двигатель расход топлива увеличивается. При этом количество подаваемого водорода оставалось постоянным в объеме $Dв(V)const$ и составляло 8%. Следовательно, его концентрация в топливновоздушной смеси падает с увеличением нагрузки на двигатель. Из-за снижения концентрации водорода в топливновоздушной смеси падает и эффект от его добавления (таблица 2 и рисунки 3, 4).

Таблица 2

Оценка изменения расхода топлива при добавке водорода в объеме 8%

V, км/ч	Передача: i	n, об/мин (на стенде)	Расход топлива (бензин) $Q_{vб}$ л/100км	Расход топлива (бензин+8% водород) $Q_{vбв}$ л/100км	Отклонение расхода топлива $\delta_{(Vi)}$ (%)
40	4	1630	10,4	9,55	8,9
45	4	1834	12,65	12,1	4,55
50	4	2038	15,33	14,93	2,66

Полученные данные были аппроксимированы квадратичными зависимостями $Y = a + bx + cx^2$, что отражено на рисунке 3. Y принимает значения соответственно $Q_{vб}$ и $Q_{vбв}$.

$$Y = (Q_{vб}; Q_{vбв}), \text{ л/100км}$$

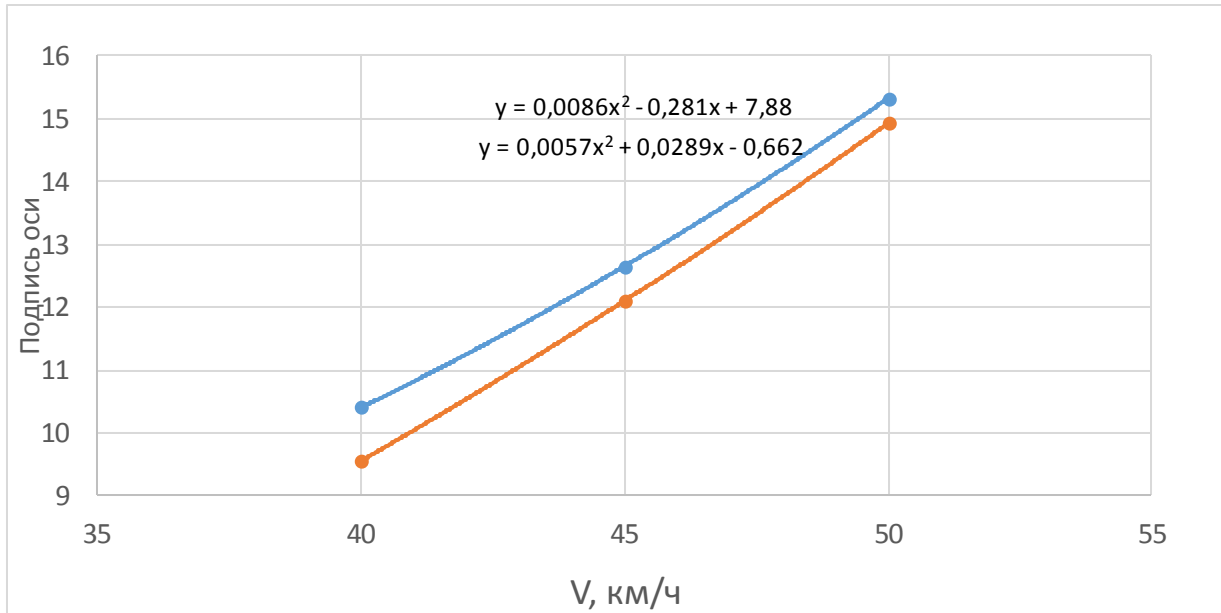


Рис. 3. Сравнение расхода топлива на бензиновоздушной $Y = Q_{vб}$ и бензиноводородной $Y = Q_{vбв}$ смесях

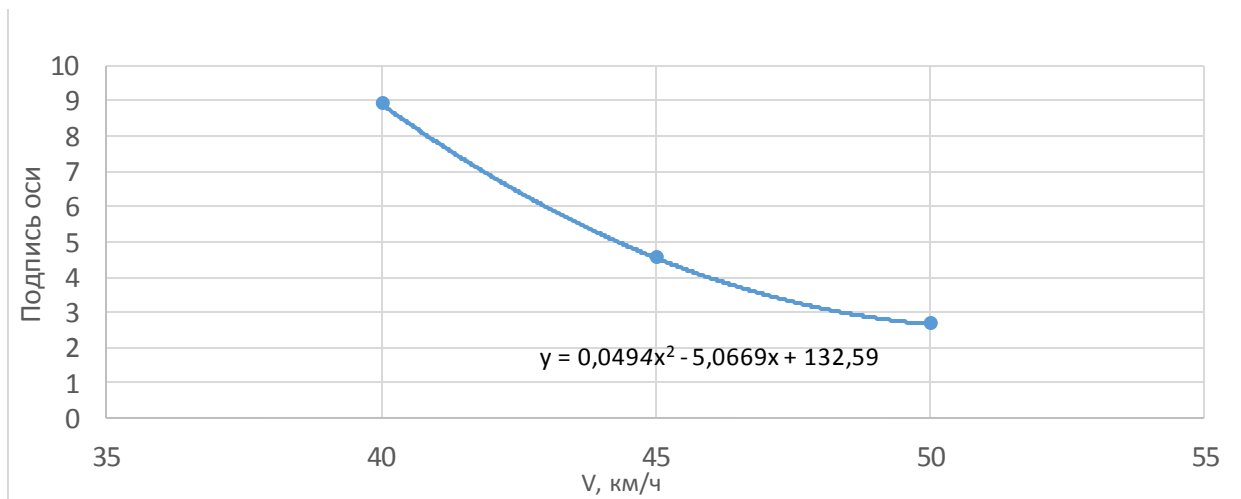


Рис. 4. Снижение эффекта экономии расхода топлива $Y = \delta_{(vi)}$ (%) при постоянном объеме подаваемого водорода (8 %) в бензиновоздушную смесь (таблица 2)

Для обеспечения постоянной экономии расхода топлива необходимое количество подаваемого водорода для выбранного скоростного диапазона и, соответственно, нагрузки может быть определено с использованием выражения вида:

$$D(V_i)var = \frac{\delta(V)max}{\delta(Vi)} * D_B(V) const, \quad (2)$$

где $\delta(V)max$ – максимальное значение экономии расхода топлива, %;

$\delta(Vi)$ – снижение расхода топлива на бензиновоздушной и бензиноводородной смесях, %;

$D_B(V) const = 8\%$ – исходное постоянное значение количества подаваемого водорода.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенные экспериментальные исследования и обработка полученных данных позволили определить на основе использования выражения (2) необходимый объем добавляемого водорода $D(V_i, \%)$ в топливновоздушную смесь для обеспечения постоянной экономии топлива до $\delta(V)max = 8,9\%$ в скоростном диапазоне 40, 45 и 50 км/ч (рисунок 5).

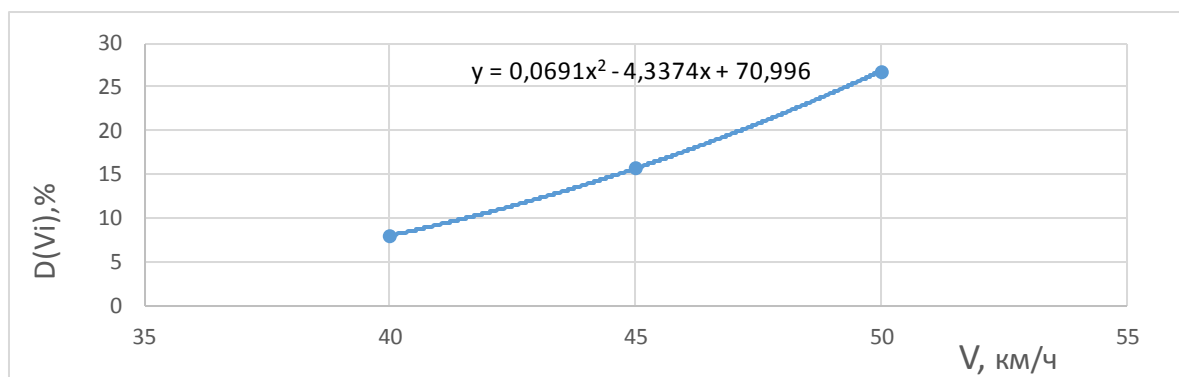


Рис. 5. Относительное добавление водорода $y = D(V_i)$ в % в топливновоздушную смесь (от $x = v$) для снижения расхода топлива (бензина) до $\delta(V)max = 8,9\%$

В процессе исследования проведена предварительная оценка эффективных расходов топлива двигателем на бензиновоздушной $ge_{\text{б}}$ и бензиноводородной смесях $ge_{\text{бв}}$ [8]:

$$ge_{\text{бв}} = \frac{Q_{\text{бв}i}}{Q_{\text{б}i}} * ge_{\text{б}i}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{бв}i}$ – расход топлива на бензино-водородной смеси;

$Q_{\text{б}i}$ – расход топлива на бензине;

$ge_{\text{б}i}$ – эффективный расход топлива на бензине.

В таблице 3 и на рисунке 6 представлены результаты сравнительной оценки эффективного расхода топлива в г/лс.час при работе двигателя на бензиновоздушной и бензиноводородной смесях в режимах дорожных и стендовых испытаний при добавке водорода в объеме 8% = const. Такое снижение лежит в диапазоне от 8,2 до 2,6% в зависимости от изменения нагрузки (скоростного режима движения автомобиля при постоянном объеме подаваемого водорода в бензовоздушную смесь).

Таблица 3

Оценка эффективного расхода топлива в г/лс.час при работе двигателя на бензиновоздушной и бензиноводородной смесях

Скорость V, км/ч	Передача: i	n, об/мин (на стенде)	Эффективный расход топлива: бензин: ge_6^{CT}	Эффективный расход топлива бензиноводород: ge_{6B}^{CT}
40	4	1630	605,08	555,63
45	4	1834	515,84	493,41
50	4	2038	439,17	427,79

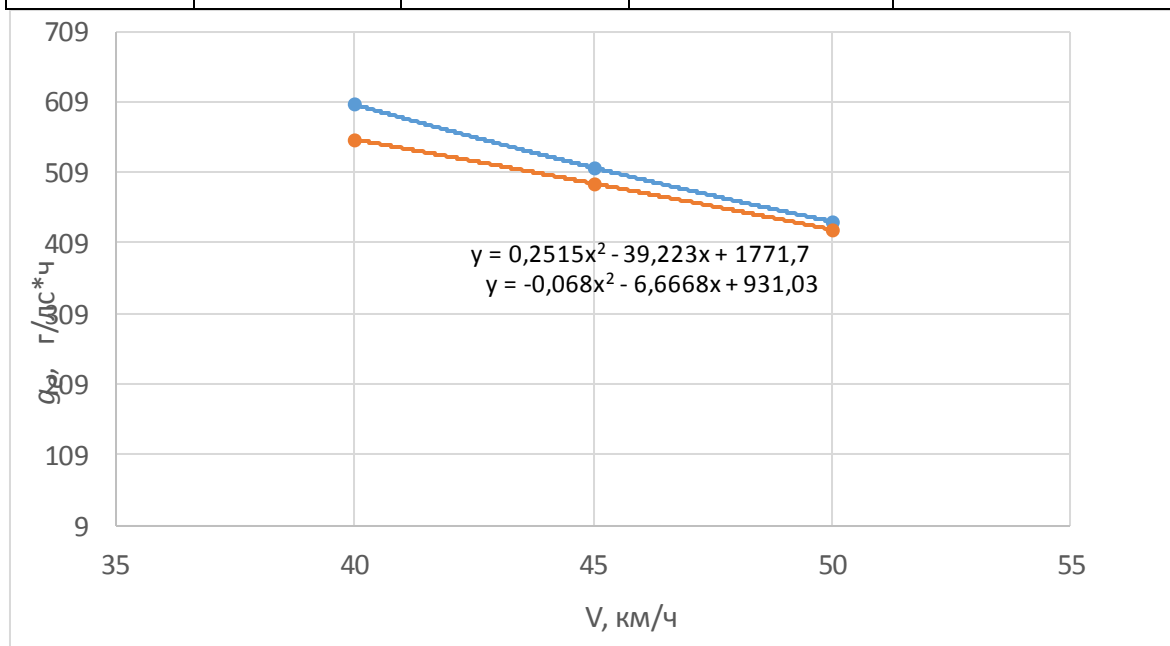


Рис. 6. Сравнение изменения эффективного расхода топлива на бензиновоздушной и бензиноводородной смеси (с добавлением водорода в объеме 8%)

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности использования бензоводородных смесей в двигателях внутреннего сгорания. При этом достигается снижение расхода топлива и, соответственно, снижение вредных выбросов в отработавших газах. В то же время для управления снижением расхода топлива (бензина) необходимо регулирование подачи водорода в зависимости от скоростного режима, что потребует калибровки топливной карты и отработки алгоритмов расчета в зависимости от нагрузки и оборотов двигателя, необходимого времени впрыска бензина и подачи водорода. Последнее достигается путем коррекции базового времени впрыска бензина (*t_{ibb}*) и коррекции (*kkop*) времени и объема подачи водорода в зависимости от внешних факторов (скорости движения автомобиля и нагрузки на двигатель). В данном случае могут быть использованы принципы управления работой двигателей на газообразном топливе [1, 5].

Перспективные направления проведения дальнейших исследований могут быть направлены на:

- оценку технического состояния компонентов современных двигателей, эксплуатируемых на альтернативных видах топлива – бензоводородных смесях;
- разработку планов диагностирования (очередности проверок) компонентов двигателей, эксплуатируемых на альтернативных видах топлива, с учетом приоритетности поиска неисправностей на основе диагностической ценности выходных показателей.

Выводы

1. В результате проведенных исследований получены результаты по оценке изменения (снижения) расхода топлива при добавлении водорода в бензино-воздушную смесь. При добавлении водорода в топливовоздушную смесь в объеме 8% может быть достигнута экономия расхода топлива с учетом затрат на электролиз до 8,9%.

2. Определены перспективные направления проведения дальнейших исследований, направленные на калибровку топливных карт и отработку алгоритмов расчета подачи бензина и водорода в зависимости от нагрузки и оборотов двигателя.

3. По результатам серии опытов можно сделать вывод, что при работе двигателя с добавкой водорода в топливовоздушную смесь, наряду со снижением расхода топлива, имеет место снижение вредных выбросов в отработавших газах в гр/км пути, что повышает экологическую безопасность транспортных средств.

Список источников

1. Зенченко, В. А. Диагностирование компонентов газовой системы питания на основе анализа коррекций топливных карт с целью выявления технического состояния двигателя с бинарной системой / В. А. Зенченко, А. Н. Пронников, Ю. В. Панов // Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта : Сборник научных трудов по материалам 84-й международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, посвященный 90-летию кафедры ЭАТиС МАДИ, Москва, 27–29 января 2026 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2026. – С. 81-93. – EDN FVNOWI.
2. Применение комбинированной энергетической установки при переводе двигателя внутреннего сгорания на альтернативное топливо для снижения выбросов с отработавшими газами углеродосодержащих соединений / В. З. Нгуен, А. Ю. Дунин, П. В. Душкин [и др.] // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2024. – № 2(40). – EDN DELATS.
3. Смоленская, Н. М. Токсичность отработавших газов в бензиновых двигателях при работе на сжатом природном газе и бензине / Н. М. Смоленская, В. В. Смоленский // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 57-65. – DOI 10.14529/engin180406. – EDN YRJMAP.
4. Патрахальцев, Н. Н. Некоторые возможности применения в дизелях альтернативных топлив в качестве добавок к основному дизельному / Н. Н. Патрахальцев // Транспорт на альтернативном топливе. – 2020. – № 3(75). – С. 44-52. – EDN LFBOJJ.
5. Физическое моделирование рабочего процесса газодизеля / М. Г. Шатров, А. С. Хачиян, В. В. Синявский [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – № 4. – С. 3-10. – EDN YTXOEZ.
6. Повышение технико-экономических и экологических показателей двигателя внутреннего сгорания путем добавки водорода в топливовоздушную смесь / А. Р. Асоян,

В. А. Зенченко, Б. С. Борисов [и др.] // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2022. – № 3(70). – С. 34-39. – EDN FLVVJU.

7. Methodology for calibrating the gas injector plunger stroke / P. P. Makhov, Yu. V. Panov, E. N. Besspalchaya, G. Ya. Shatagin // Science Journal of Transportation. – 2025. – No. 2(22). – P. 41-48. – EDN AIYUNG.

8. Зенченко, В. А. Проведение исследований по оценке топливно-экономических показателей легковых автомобилей с бензиновыми двигателями, работающими с добавлением водорода в топливно-воздушную смесь / В. А. Зенченко, А. И. Матусар // Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта : Сборник научных трудов по материалам 84-й международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, посвященный 90-летию кафедры ЭАТиС МАДИ, Москва, 27–29 января 2026 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2026. – С. 94-104. – EDN IHVBOF.

9. Влияние добавочного водорода на коэффициент молекулярного изменения при сгорании топлива в поршневых ДВС / Л. Н. Бортников, М. Н. Ложкин, Д. А. Павлов, А. В. Семенов // Автомобильная промышленность. – 2017. – № 11. – С. 3-7. – EDN ZSRSDD.

10. Галицкая, Е. А. Развитие электролизных технологий получения водорода в Российской Федерации / Е. А. Галицкая, О. В. Жданев // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26, № 12. – С. 57-63. – DOI 10.18412/1816-0395-2022-12-57-63. – EDN OJPTIS.

References

1. Zenchenko V.A., Pronnikov A.N., Panov Yu.V. *Aktual'nyye voprosy tekhnicheskoy ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobil'nogo transporta*, Sbornik trudov, Moscow, Moskovskiy avtomobil'no-dorozhnyy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet (MADI), 2026, pp. 81-93.

2. Nguyen V. Z., Dunin A. Yu., Dushkin P. V. Akhmetzhanova E.U., Petrov A.M. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2024, no. 2(40).

3. Smolenskaya N.M., Smolenskiy V.V. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 57-65, doi 10.14529/engin180406.

4. Patrakhal'tsev N.N. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2020, no. 3(75), pp. 44-52.

5. Shatrov M.G., Khachiyani A.S., Sinyavskiy V.V. Shishlov I.G., Vakulenko A.V. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2017, no. 4, pp. 3-10.

6. Asoyan A.R., Zenchenko V.A., Borisov B.S., Gaevsky V.V., Danilov I.K., Asoyan I.A. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2022, no. 3(70), pp. 34-39.

7. Makhov P.P., Panov Yu.V., Bepalchaya E.N., Shatagin G.Ya. Methodology for calibrating the gas injector plunger stroke, *Science Journal of Transportation*, 2025, no. 2(22), pp. 41-48.
8. Zenchenko V.A., Matusar A.I. *Aktual'nyye voprosy tekhnicheskoy ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobil'nogo transporta*, Sbornik trudov, Moscow, Moskovskiy avtomobil'no-dorozhnyy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet (MADI), 2026, pp. 94-104.
9. Bortnikov L.N., Lozhkin M.N., Pavlov D.A., Semenov A.V. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2017, no. 11, pp. 3-7.
10. Galitskaya Ye.A., Zhdaneyev O.V. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2022, vol. 26, no. 12, pp. 57-63, doi 10.18412/1816-0395-2022-12-57-63.

Рецензент: И.А. Якубович, д-р техн. наук, профессор, МАДИ

Информация об авторах

Зенченко В. А. – канд. техн. наук, доцент кафедры эксплуатации автомобильного транспорта и автосервиса, МАДИ, Москва;

Коноплёв В. Н. – д-р техн. наук, доцент кафедры техники и технологий транспорта инженерной академии РУДН, Москва;

Асоян И. А. – аспирант кафедры техники и технологий транспорта инженерной академии РУДН, Москва.

Information about the authors

Zenchenko V. A. – Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor of the Department of Automotive Transport Operation and Car Service at MADI, Moscow;

Konoplev V. N. – Doctor of Sciences (Technical), Associate Professor of the Department of Transport Engineering and Technologies at the Engineering Academy of RUDN University, Moscow;

Asoyan I. A. – Postgraduate student of the Department of Transport Engineering and Technologies at the Engineering Academy of RUDN University, Moscow.

Статья поступила в редакцию 21.05.2026; одобрена после рецензирования 29.05.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The article was submitted 21.05.2026; approved after reviewing 29.05.2026; accepted for publication 17.06.2026.