

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ ПРИ РАБОТЕ НА БЕЗУГЛЕРОДНОМ ТОПЛИВЕ

А.Ю. Дунин
Нгуен Ван Зунг

a.u.dunin@yandex.ru
nguyenvandung1996kch
y@gmail.com

Э.У. Ахметжанова
А.М. Петров
Д.С. Конюшков

onti@nich.madi.ru
psiholiric@inbox.ru
konyushkov-d.s@yandex.ru

МАДИ, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Учитывая постоянное ужесточение требований к выбросам углекислого газа в секторе двигателей внутреннего сгорания, поиск решения, способного удовлетворить эти требования, становится все более важным. В связи с этим использование безуглеродного топлива рассматривается как альтернатива традиционным видам топлива. В качестве объекта исследования выбран двигатель с искровым зажиганием типа 4Ч 7,6/7, а в качестве безуглеродного топлива — аммиак, который в жидком состоянии непосредственно впрыскивался во впускной трубопровод двигателя. Приведена математическая модель двигателя на аммиаке, разработанная с учетом его термодинамических и кинетических особенностей и возможности возникновения детонации. Результаты расчетного исследования рабочего процесса двигателя свидетельствуют о том, что из-за низкой энергетической плотности аммиака ($0,73 \text{ кг/м}^3$ при давлении $0,1 \text{ МПа}$ и температуре 298 К) для преодоления одного и того же расстояния расход топлива транспортного средства, работающего на безуглеродном топливе, больше расхода топлива транспортного средства, работающего на традиционном топливе. Общий расход топлива увеличивается, что приводит к снижению экономичности. Для повышения экономической эффективности двигателя внутреннего сгорания использована комбинированная энергетическая установка,

Ключевые слова

Двигатель с искровым зажиганием, безуглеродное топливо, аммиак, комбинированная энергетическая установка

предложены три варианта схемы компоновки ее элементов. По сравнению с обычным автомобилем расход топлива двигателя, работающего в составе комбинированной энергетической установки, снижается на 28,6 % для третьего варианта схемы компоновки, а для первого и второго вариантов схемы он увеличивается на 17,9 и 32,1 %

Поступила 08.04.2025

Принята 08.09.2025

© Автор(ы), 2026

Введение. Одной из наиболее распространенных энергетических установок (ЭУ) легковых автомобилей остается двигатель с искровым зажиганием (ДСИЗ), к которому предъявляются комплексные требования по экологии и энергоэффективности с учетом требуемого уровня его форсирования. Параллельно с этим активно обсуждается вопрос отказа от традиционного нефтяного топлива, запасы которого считаются конечными, а применение наносит серьезный ущерб экологии [1–4].

Возникающий в результате сжигания ископаемого топлива парниковый эффект представляет собой глобальное потепление в окружающей среде, что приводит к негативным воздействиям на природу и жизнь человека. Основной причиной парникового эффекта является большое число выбросов в окружающую среду парниковых газов, значительная их часть приходится на углекислый газ [5–8].

Применение альтернативных топлив не только расширяет сырьевую базу, но и снижает вредное влияние на окружающую среду [9–14]. Среди топлив не нефтяного происхождения особое место занимает аммиак.

К преимуществам аммиака относят практически неограниченную сырьевую базу и отработанность технологии промышленного производства. При полном сгорании аммиака образуется только один вредный компонент — оксид азота NO_x , причем в незначительных количествах, так как температура горения аммиачно-воздушной смеси сравнительно невысока и практически нет продуктов углеродсодержащих соединений [14–16]. Аммиак также применяется в качестве восстановителя при селективной нейтрализации [17–18].

В природе аммиак встречается в виде солей. Он хорошо растворяется в воде, что обеспечивает контроль утечки и позволяет избежать риск пожара или взрыва. Аммиак имеет низкую температуру застывания (195,7 К), что делает его перспективным топливом для регионов с холодным климатом. Путем разложения аммиака можно получить водород, который применяется в топливных водородных элементах [19–21].

Далее приведены основные свойства аммиака в сравнении со свойствами бензина и водорода.

Свойства бензина, аммиака, водорода

	Бензин	Аммиак	Водород
Давление при хранении топлива, МПа:			
в жидком состоянии			
при температуре 300 К	0,1	1,1	70
Низшая теплота сгорания H_u , МДж/кг	44,5	18,8	120
Плотность при 0,1 МПа и 298 К, кг/м ³	736	0,73	0,08
Температура самовоспламенения, К	503	930	773–850
Ламинарная скорость горения, м/с	0,58	0,015	3,51
Октановое число	90–98	130	> 100
Массовое содержание углерода, %	85,5	0	0

Плотность аммиака ниже, чем у бензина, поэтому необходимо увеличить общее количество аммиачного топлива, подаваемого в ДсИЗ, что снижает производительность транспортного средства (ТС). В связи с этим для компенсации потери мощности ДсИЗ при использовании аммиака в качестве топлива и одновременно для более экономичной работы в настоящей работе предлагается использовать комбинированную энергетическую установку (КЭУ), что приведет к снижению расхода топлива двигателя при движении по ездовому циклу.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Транспортное средство в составе КЭУ приводится в движение с помощью силовой установки, в состав которой входят основные компоненты, различающиеся по обратимости энергии. Применяемое в ДсИЗ традиционное нефтяное топливо относится к необратимым источникам энергии. Аккумуляторная батарея (АКБ), входящая в ЭУ, — обратимый источник электрической энергии, способный как забирать, так и отдавать ее.

В качестве объекта исследования выбран ДсИЗ 4Ч 7,6/7 с номинальными мощностью 60 кВт и частотой вращения коленчатого вала $n_{ном} = 5000 \text{ мин}^{-1}$. Аммиак впрыскивается во впускной трубопровод. Максимальный крутящий момент $M_k = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}$ достигается при частоте вращения коленчатого вала $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$. Степень сжатия в исследуемом ДсИЗ составляет 9,9.

Расчетные исследования проведены с применением программного комплекса «ДВС–МАДИ», разработанного на кафедре «Теплотехника и автотракторные двигатели» МАДИ. Сопоставление результатов расчета рабочего цикла ДсИЗ 7,6/7 с экспериментальными данными при детонационном сгорании бензина приведено на рис. 1.

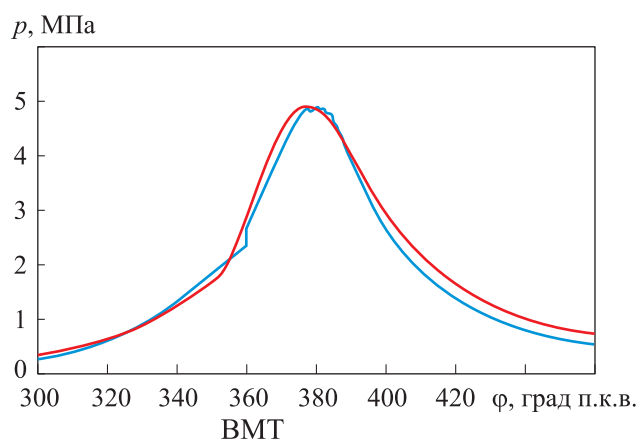


Рис. 1. Сопоставление результатов расчета рабочего цикла ДсИЗ 4Ч 4 7,6/7 с экспериментальными данными при детонационном сгорании бензина:

— эксперимент; — расчет ($dx_{\max} = 0,1$)

Для оценки вероятности возникновения детонации в модели рабочего процесса ДсИЗ используется доля детонирующего топлива (dx), определяемая как разность значения x , соответствующего полному сгоранию всего топлива ($x = 1$), и текущего значения x , при котором $y = 1$: $dx = 1 - x_{y=1}$ (y — расчетный показатель детонации) [4, 6].

Для проверки адекватности математической модели рабочего процесса ДсИЗ при работе на различных топливах проведена серия расчетов. Проверку выполняли, сопоставляя результаты расчета рабочего цикла ДсИЗ при работе на бензине, аммиаке и водороде при разных параметрах (рис. 2). В случае работы на бензине в качестве экспериментальных данных выбраны результаты, полученные при испытании ДсИЗ 4Ч 7,6/7 модели ВАЗ 2108, проведенном в Проблемной лаборатории транспортных двигателей МАДИ. Данные для ДсИЗ 1Ч 11,5/7,7 модели ЕР 6 (на аммиаке) и ДсИЗ 4Ч 8,6/8,6 модели СА 20 (на водороде) взяты из открытых источников.

При проведении серии расчетов (см. рис. 2) значения показателей кривой тепловыделения для каждого топлива предварительно определялись путем обработки экспериментальных данных. Критерием верного выбора показателя является достижение расчетных значений, близких к экспериментальным значениям максимального давления цикла p_z , и наибольшей скорости нарастания давления $(dp/d\varphi)_{\max}$. Это позволило получить среднюю погрешность моделирования и эксперимента менее 5 %.

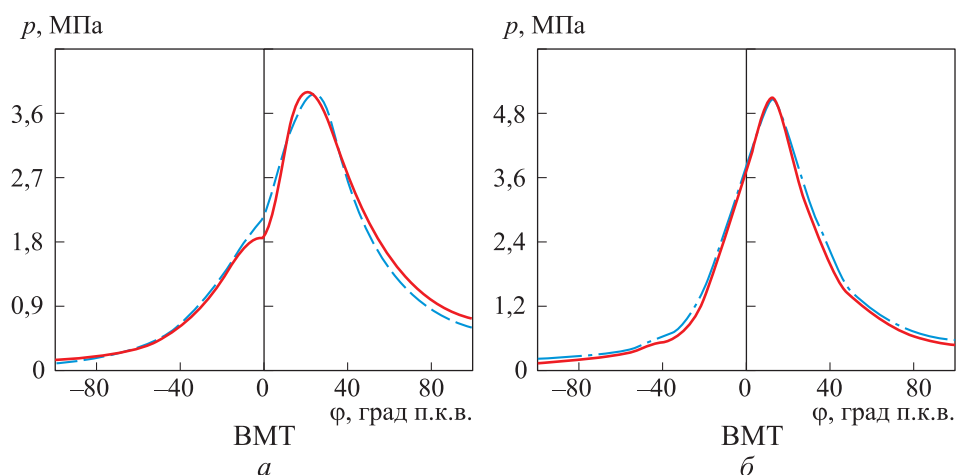
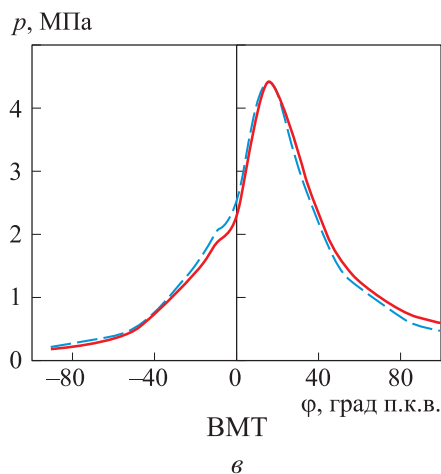


Рис. 2. Сопоставление результатов расчета рабочего цикла ДсИЗ при работе на бензине (а), аммиаке (б), водороде (в) при разных параметрах:

а — ДсИЗ 4Ч 7,6/7 модель ВАЗ 2108, $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, $\alpha = 1,0$, $\varphi = 15 \text{ град п.к.в.}$;
 б — ДсИЗ 1Ч 11,5/7,7 модель ЕР 6, $n = 31000 \text{ мин}^{-1}$, $\alpha = 1,2$, $\varphi = 35 \text{ град п.к.в.}$;
 в — ДсИЗ 4Ч 8,6/8,6 модель СА 20, $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, $\alpha = 1,64$, $\varphi = 15 \text{ град п.к.в.}$;

— расчет; — эксперимент;
 —•— данные из открытых источников



Результаты сравнения показателей работы ДсИЗ 4Ч 7,6/7 по внешней скоростной характеристике (ВСХ) на бензине и аммиаке приведены на рис. 3. Установлено, что при переходе с бензина на аммиак на ВСХ максимальный крутящий момент M_k снизился на 15,8 %, максимальная мощность N_e — на 11,3 %. При этом удельный расход g_e аммиака почти в 2,5 раза выше, чем у бензина. Однако значение доли детонирующего топлива dx для бензина существенно выше, чем у аммиака.

Математическая модель электрической части КЭУ описывается на основе применения упрощенной Г-образной схемы замещения асинхронного двигателя.

В основу моделирования режима движения автомобиля положен тяговый расчет ТС. При моделировании рассматривались три режима работы КЭУ.

Первый режим (КЭУ № 1) — колеса ТС приводятся в движение тяговым электродвигателем (ТЭД).

Второй режим (КЭУ № 2) — колеса ТС приводятся в движение ДВС.

Третий режим (КЭУ № 3) — ДВС и ТЭД работают параллельно.

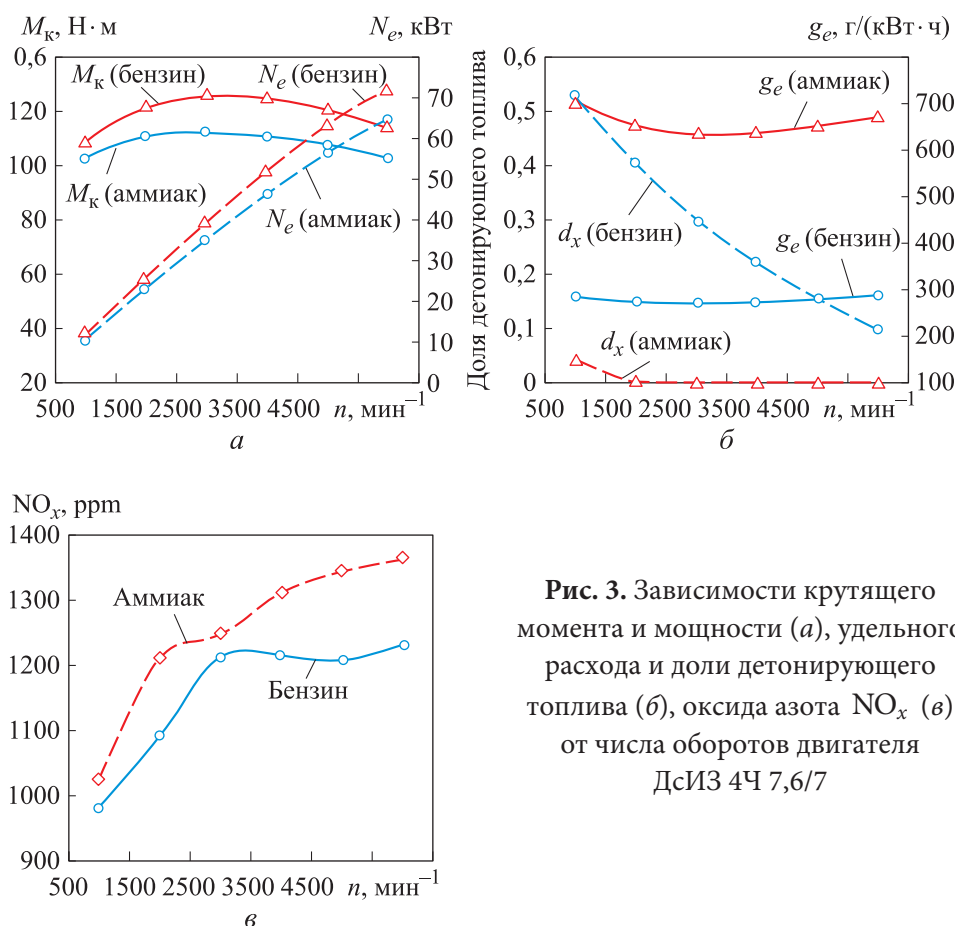


Рис. 3. Зависимости крутящего момента и мощности (а), удельного расхода и доли детонирующего топлива (б), оксида азота NO_x (в) от числа оборотов двигателя ДсИЗ 4Ч 7,6/7

Схемы передачи энергии между элементами КЭУ при работе на трех характерных режимах приведены на рис. 4.

Результаты. Для анализа работы ДсИЗ в составе КЭУ предложен расчетный ездовой цикл, который характеризует возможность работы КЭУ, когда ТС уезжает и приезжает с заряженной АКБ. Расчетный ездовой цикл длительностью 1220 с состоит из трех частей. Городские режимы движения длительностью 400 с при максимальной 50 км/ч и средней 18,7 км/ч скоростях составляют первую и третью части расчетного ездового цикла. Режимы движения по трассе с максимальной 120 км/ч и средней 62,2 км/ч скоростями составляют вторую часть. Результаты расчета

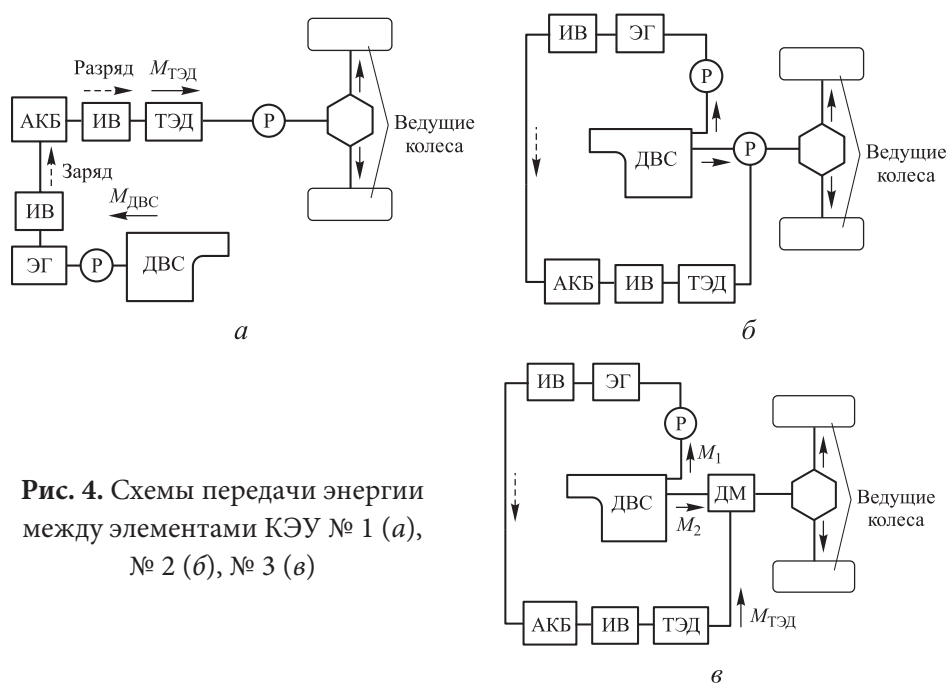


Рис. 4. Схемы передачи энергии между элементами КЭУ № 1 (а), № 2 (б), № 3 (в)

режимов работы ДсИЗ в составе КЭУ при питании его аммиаком приведены на рис. 5 и 6. В случае применения КЭУ учитывалось увеличение массы автомобиля (из-за электрической составляющей КЭУ).

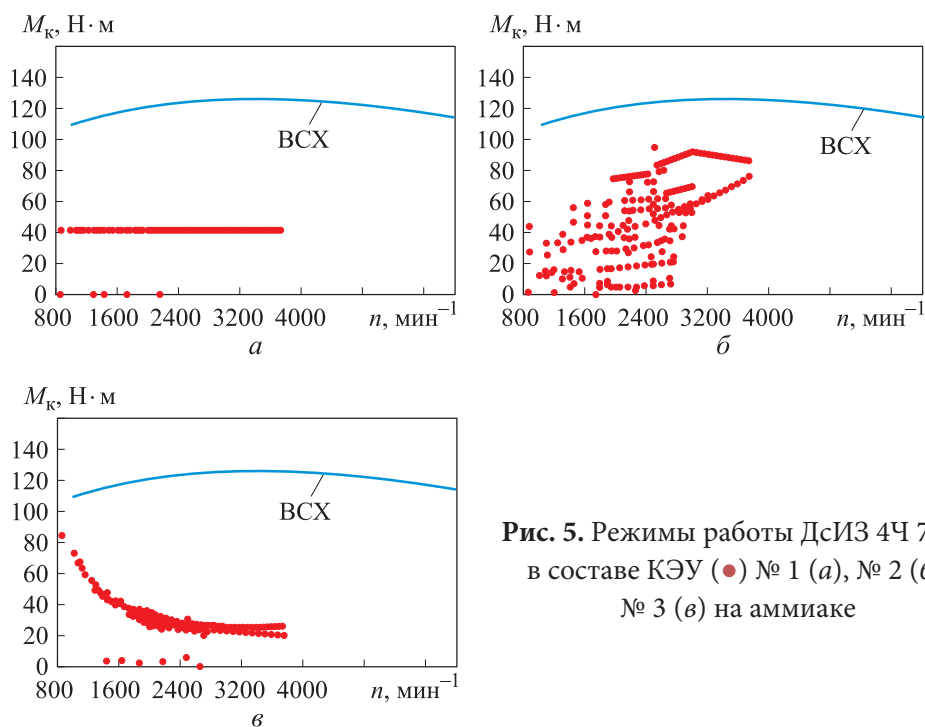


Рис. 5. Режимы работы ДсИЗ 4Ч 7,6/7 в составе КЭУ (•) № 1 (а), № 2 (б), № 3 (в) на аммиаке

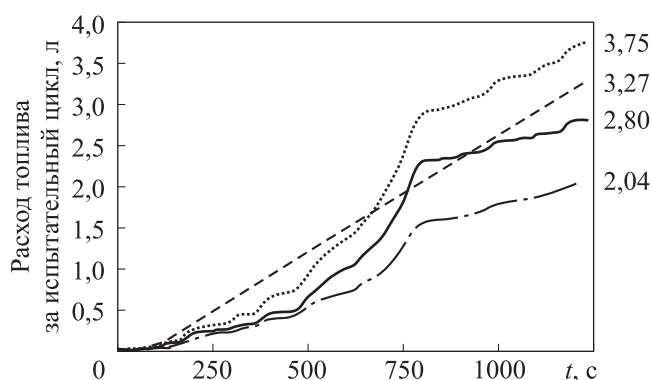


Рис. 6. Расход топлива ДсИЗ 4Ч 7,6/7 за ездовой цикл на режиме работы КЭУ № 1 (.....), № 2 (-----), № 3 (-.-.-) и для обычного автомобиля (—) на аммиаке

Для более наглядного представления режимов работы двигателя в составе КЭУ на рис. 5 они сверху ограничены ВСХ ДсИЗ 4Ч 7,6/7. Результаты вычисления расхода аммиака ДсИЗ за ездовой цикл приведены на рис. 6. Применение КЭУ снижает расход аммиака только для КЭУ № 3. По сравнению с расходом аммиака ДсИЗ обычного автомобиля он снижается на 28,6 % для КЭУ № 3, а для КЭУ № 1, 2 увеличивается на 17,9 и 32,1 %.

Заключение. Аммиак является перспективным топливом вследствие низкой стоимости, практически неограниченной сырьевой базы и относительной по сравнению с водородом простотой хранения. При полном сгорании аммиака образуется только один вредный компонент — оксид азота NO_x . Из аммиака можно получать водород для его дальнейшего применения в автомобильных двигателях.

Расчетные исследования показали, что при переводе ДсИЗ с бензина на аммиак резко снижается вероятность детонационного сгорания на режимах с высокой нагрузкой и низкой частотой вращения коленчатого вала. Однако отмечается падение мощностных показателей (максимальный крутящий момент снизился на 15,8 %) и рост удельного эффективного расхода более чем в 2 раза. Последнее возможно нивелировать при работе ДсИЗ в составе КЭУ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Александров А.А. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания. М., Инженер, Оникo-M, 2012.
- [2] Марков В.А., Девянин С.Н., Семенов В.Г. и др. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях. М., Инженер, Оникo-M, 2011.

- [3] Марков В.А., Бебенин Е.В., Поздняков Е.Ф. Сравнительная оценка альтернативных топлив для дизельных двигателей. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2013, № 5, с. 24–29.
- [4] Нгуен В.З., Дунин А.Ю., Ахметжанова Э.У. и др. Моделирование рабочего процесса двигателя с искровым зажиганием, питаемого безуглеродным топливом. *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*, 2023, № 4 (38).
URL: <https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1294>
- [5] Таранушич В.А., Савостьянов А.П., Сулима С.И. и др. Технология катализаторов. Новочеркасск, ЮРГТУ (НПИ), 2012.
- [6] Dauaud A.M., Eyzat P. Four-octane-number method for predicting the anti-knock behavior of fuels and engines. *SAE Tech. Pap.*, 1978, art. 780080.
DOI: <https://doi.org/10.4271/780080>
- [7] Valera M.A., Xiao H., Owen J.M., et al. Ammonia for power. *Prog. Energy Combust. Sc.*, 2018, vol. 69, pp. 63–102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>
- [8] Morch C., Bjerre A., Gottrup M., et al. Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: engine performance and analysis of a proposed fuel system. *Fuel*, 2011, vol. 90, no. 2, pp. 854–864. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.09.042>
- [9] Onorati A., Payri R., Vaglieco B., et al. The role of hydrogen for future internal combustion engines. *Int. J. Engine Res.*, 2022, vol. 23, no. 4, pp. 529–540.
DOI: <https://doi.org/10.1177/14680874221081947>
- [10] Mounaim R.C., Brequigny P., Medina A.V., et al. Ammonia as fuel for transportation to mitigate zero carbon impact. In: *Engines and fuels for future transport*. Springer, 2021, pp. 257–279. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-8717-4_11
- [11] Ryu K., Zacharakis-Jutz G.E., Kong S.C. Effects of gaseous ammonia direct injection on performance characteristics of a spark-ignition engine. *Appl. Energy*, 2014, vol. 116, pp. 206–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.067>
- [12] Zamfirescu C., Dincer I. Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicle applications. *Fuel Process. Technol.*, 2009, vol. 90, no. 5, pp. 729–737.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.02.004>
- [13] Zieba M., Brink A., Schuster A., et al. Ammonia chemistry in a flameless jet. *Combust. Flame*, 2009, vol. 156, no. 10, pp. 1950–1956.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.07.002>
- [14] Valera M.A., Amer-Hatem F., Azad A.K., et al. Review on ammonia as a potential fuel. *Energy Fuels*, 2021, vol. 35, no. 9, pp. 6964–7029.
DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03685>
- [15] Um D.H., Joo J.M., Lee S., et al. Combustion stability limits and NO_x emissions of nonpremixed ammonia-substituted hydrogen–air flames. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2013, vol. 38, no. 34, pp. 14854–14865. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.08.140>
- [16] Song Y., Hashemi H., Christensen J.M., et al. Ammonia oxidation at high pressure and intermediate temperatures. *Fuel*, 2016, vol. 181, pp. 358–365.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.100>

[17] Pozzana G., Bonfanti N., Frigo S., et al. A hybrid vehicle powered by hydrogen and ammonia. *SAE Tech. Pap.*, 2012, art. 2012-32-0085.

DOI: <https://doi.org/10.4271/2012-32-0085>

[18] Li J., Huang H., Kobayashi N., et al. Study on using hydrogen and ammonia as fuels: combustion characteristics and NO_x formation. *Int. J. Energy Res.*, 2014, vol. 38, no. 9, pp. 1214–1223. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.3141>

[19] Li J., Huang H., Kobayashi N., et al. Numerical study on effect of oxygen content in combustion air on ammonia combustion. *Energy*, 2015, vol. 93-2, pp. 2053–2068.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.060>

[20] Lhuillier C., Brequigny P., Contino F., et al. Combustion characteristics of ammonia in a modern spark-ignition engine. *SAE Tech. Pap.*, 2019, art. 2019-24-0237.

DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-24-0237>

[21] Mounaim-Rousselle C., Bréquigny P., Dumand C., et al. Operating limits for ammonia fuel spark-ignition engine. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 14, art. 4141.

DOI: <https://doi.org/10.3390/en14144141>

Дунин Андрей Юрьевич — д-р техн. наук, доцент кафедры «Теплотехника и автотракторные двигатели» МАДИ (Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, д. 64).

Нгуен Ван Зунг — аспирант кафедры «Теплотехника и автотракторные двигатели» МАДИ (Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, д. 64).

Ахметжанова Эльмира Умяровна — аспирантка кафедры «Теплотехника и автотракторные двигатели» МАДИ (Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, д. 64).

Петров Андрей Михайлович — аспирант кафедры «Теплотехника и автотракторные двигатели» МАДИ (Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, д. 64).

Конюшков Дмитрий Сергеевич — аспирант кафедры «Теплотехника и автотракторные двигатели» МАДИ (Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, д. 64).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Дунин А.Ю., Нгуен Ван Зунг, Ахметжанова Э.У. и др. Применение комбинированной энергетической установки для улучшения характеристик двигателя с искровым зажиганием при работе на безуглеродном топливе. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2026, № 1 (156), с. 101–114.

EDN: AKOYXB

USE OF A COMBINATION POWER SYSTEM TO IMPROVE THE PERFORMANCE OF A SPARK-IGNITION ENGINE RUNNING ON CARBON-FREE FUEL

A.Yu. Dunin
Nguyen Van Dung

a.u.dunin@yandex.ru
nguyenvandung1996kch
@gmail.com

E.U. Akhmetzhanova

onti@nich.madi.ru

A.M. Petrov

psiholiric@inbox.ru

D.S. Konyushkov

konyushkov-d.s@yandex.ru

MADI, Moscow, Russian Federation

Abstract

Given the ever-increasing stringency of carbon dioxide emission requirements in the internal combustion engine sector, finding a solution that meets these requirements is becoming increasingly important. As a result, the use of carbon-free fuels is being considered as an alternative to traditional fuels. In this article, the focus is on a 4-cylinder 7.6/7-liter spark-ignition engine (4Ch 7.6/7 type), and the use of ammonia as a carbon-free fuel that is directly injected into the engine's intake manifold in its liquid state. The article develops a mathematical model of an engine operating on ammonia, taking into account its thermodynamic and kinetic properties and the possibility of detonation. The results of the computational study of the engine's working process indicate that due to the low energy density of ammonia (0.73 kg/m^3 at a pressure of 0.1 MPa, and a temperature of 298 K), the fuel consumption of a vehicle operating on a carbon-free fuel is higher than that of a vehicle operating on traditional fuel for covering the same distance. This increases the overall fuel consumption, resulting in reduced fuel efficiency. Next, a combination power system is used to improve the engine's economic efficiency. Three options for arranging the components of the combination power system are proposed. Compared to a conventional vehicle, the fuel consumption of an engine operating as part of a combination power system is reduced by 28.6 % for the third option, while it increases by 17.9 % and 32.1 % for the first and second options, respectively

Keywords

Spark-ignition internal combustion engine, carbon-free fuel, ammonia, combination power system

Received 08.04.2025

Accepted 08.09.2025

© Author(s), 2026

REFERENCES

- [1] Aleksandrov A.A. Alternativnye topliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya [Alternative fuels for internal combustion engines]. Moscow, Inzhener Publ., Oniko-M Publ., 2012.
- [2] Markov V.A., Devyanin S.N., Semenov V.G., et al. Ispolzovanie rastitelnykh masel i topliv na ikh osnove v dizelnykh dvigatelyakh [Use of vegetable oils and fuels based on them in diesel engines]. Moscow, Inzhener Publ., Oniko-M Publ., 2011.
- [3] Markov V.A., Bebenin E.V., Pozdnyakov E.F. Comparative evaluation of alternative fuels for diesel engines. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2013, no. 5, pp. 24–29 (in Russ.).
- [4] Nguen V.Z., Dunin A.Yu., Akhmetzhanova E.U., et al. Simulation of the operating process of a spark ignition engine powered by carbon-free fuel. *Avtomobil. Doroga. Infrastruktura*, 2023, no. 4 (in Russ.).
Available at: <https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1294>
- [5] Taranushich V.A., Savostyanov A.P., Sulima S.I., et al. Tekhnologiya katalizatorov [Catalyst technology]. Novocherkassk, YuRGTU(NPI) Publ., 2012.
- [6] Dauaud A.M., Eyzat P. Four-octane-number method for predicting the anti knock behavior of fuels and engines. *SAE Tech. Pap.*, 1978, art. 780080.
DOI: <https://doi.org/10.4271/780080>
- [7] Valera M.A., Xiao H., Owen J.M., et al. Ammonia for power. *Prog. Energy Combust. Sc.*, 2018, vol. 69, pp. 63–102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>
- [8] Morch C., Bjerre A., Gottrup M., et al. Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: engine performance and analysis of a proposed fuel system. *Fuel*, 2011, vol. 90, no. 2, pp. 854–864. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.09.042>
- [9] Onorati A., Payri R., Vaglieco B., et al. The role of hydrogen for future internal combustion engines. *Int. J. Engine Res.*, 2022, vol. 23, no. 4, pp. 529–540.
DOI: <https://doi.org/10.1177/14680874221081947>
- [10] Mounaim R.C., Brequigny P., Medina A.V., et al. Ammonia as fuel for transportation to mitigate zero carbon impact. In: *Engines and fuels for future transport*. Springer, 2021, pp. 257–279. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-8717-4_11
- [11] Ryu K., Zacharakis-Jutz G.E., Kong S.C. Effects of gaseous ammonia direct injection on performance characteristics of a spark-ignition engine. *Appl. Energy*, 2014, vol. 116, pp. 206–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.067>
- [12] Zamfirescu C., Dincer I. Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicle applications. *Fuel Process. Technol.*, 2009, vol. 90, no. 5, pp. 729–737.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.02.004>
- [13] Zieba M., Brink A., Schuster A., et al. Ammonia chemistry in a flameless jet. *Combust. Flame*, 2009, vol. 156, no. 10, pp. 1950–1956.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.07.002>

- [14] Valera M.A., Amer-Hatem F., Azad A.K., et al. Review on ammonia as a potential fuel. *Energy Fuels*, 2021, vol. 35, no. 9, pp. 6964–7029.
DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03685>
- [15] Um D.H., Joo J.M., Lee S., et al. Combustion stability limits and NO_x emissions of nonpremixed ammonia-substituted hydrogen–air flames. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2013, vol. 38, no. 34, pp. 14854–14865. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.08.140>
- [16] Song Y., Hashemi H., Christensen J.M., et al. Ammonia oxidation at high pressure and intermediate temperatures. *Fuel*, 2016, vol. 181, pp. 358–365.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.100>
- [17] Pozzana G., Bonfanti N., Frigo S., et al. A hybrid vehicle powered by hydrogen and ammonia. *SAE Tech. Pap.*, 2012, art. 2012-32-0085.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2012-32-0085>
- [18] Li J., Huang H., Kobayashi N., et al. Study on using hydrogen and ammonia as fuels: combustion characteristics and NO_x formation. *Int. J. Energy Res.*, 2014, vol. 38, no. 9, pp. 1214–1223. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.3141>
- [19] Li J., Huang H., Kobayashi N., et al. Numerical study on effect of oxygen content in combustion air on ammonia combustion. *Energy*, 2015, vol. 93-2, pp. 2053–2068.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.060>
- [20] Lhuillier C., Brequigny P., Contino F., et al. Combustion characteristics of ammonia in a modern spark-ignition engine. *SAE Tech. Pap.*, 2019, art. 2019-24-0237.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-24-0237>
- [21] Mounaim-Rousselle C., Bréquigny P., Dumand C., et al. Operating limits for ammonia fuel spark-ignition engine. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 14, art. 4141.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en14144141>

Dunin A.Yu. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Thermal Engineering and Automobile and Tractor Engines, MADI (Leningradskiy prospekt 64, Moscow, 125319 Russian Federation).

Nguyen Van Dung — Post-Graduate Student, Department of Thermal Engineering and Automobile and Tractor Engines, MADI (Leningradskiy prospekt 64, Moscow, 125319 Russian Federation).

Akhmetzhanova E.U. — Post-Graduate Student, Department of Thermal Engineering and Automobile and Tractor Engines, MADI (Leningradskiy prospekt 64, Moscow, 125319 Russian Federation).

Petrov A.M. — Post-Graduate Student, Department of Thermal Engineering and Automobile and Tractor Engines, MADI (Leningradskiy prospekt 64, Moscow, 125319 Russian Federation).

Konyushkov D.S. — Post-Graduate Student, Department of Thermal Engineering and Automobile and Tractor Engines, MADI (Leningradskiy prospekt 64, Moscow, 125319 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Dunin A.Yu., Nguyen Van Dung, Akhmetzhanova E.U., et al. Use of a combination power system to improve the performance of a spark-ignition engine running on carbon-free fuel. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2026, no. 1 (156), pp. 101–114 (in Russ.). EDN: AKOYXB