

Научная статья
УДК 621. 443

Применение комбинированной энергетической установки при переводе двигателя внутреннего сгорания на альтернативное топливо для снижения выбросов с отработавшими газами углеродосодержащих соединений

Ван Зунг Нгуен¹, Андрей Юрьевич Дунин², Павел Витальевич Душкин³,
Эльмира Умяровна Ахметжанова⁴, Андрей Михайлович Петров⁵

^{1,2,3,4,5}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹nguyenvandung1996kchy@gmail.com

²a.u.dunin@yandex.ru

³dushkin.pavel@gmail.com

⁴onti@nich.madi.ru

⁵psiholiric@inbox.ru

Аннотация. Представлены результаты расчетного исследования рабочего процесса современного двигателя с искровым зажиганием (ДсИЗ) при его работе в составе комбинированной энергетической установки (КЭУ) легкового автомобиля, движущегося по ездовому циклу. В качестве объектов исследования рассмотрены двухцилиндровый (2Ч 7,6/7) и четырехцилиндровый (4Ч 7,6/7) двигатели со степенью сжатия $\epsilon = 9,9$. Исследование проведено при условии поддержания коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1$ при обоих ДсИЗ как на бензине, так и на аммиаке. Результаты показывают, что применение КЭУ позволяет уменьшить рабочий объем двигателя и снизить расход топлива за ездовой цикл на 18%. Отмечено уменьшение количества теплоты, подводимого в цикл с топливом на режимах средних и высоких нагрузок при обеспечении суммарной заданной мощности КЭУ, необходимой для движения транспортного средства. Это нивелирует необходимость повышения запаса топлива на борту автомобиля при переходе с бензина на аммиак, однако возникает необходимость выбора рационального сочетания требуемой мощности ДсИЗ и электрического двигателя.

Ключевые слова: двигатель с искровым зажиганием, альтернативное топливо, аммиак, комбинированная энергетическая установка.

Для цитирования: Нгуен В.З., Дунин А.Ю., Душкин П.В., Ахметжанова Э.У., Петров А.М. Применение комбинированной энергетической установки при переводе двигателя внутреннего сгорания на альтернативное топливо для снижения выбросов с отработавшими газами углеродосодержащих соединений // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2024. № 2 (40).

Original article

A solution for converting gasoline engines to use an alternative fuel with a Combination Power System to reduce emissions of carbon compounds from exhaust gases

Van Dung Nguyen¹, Andrey Yu. Dunin², Pavel L. Dushkin³, Elmira U. Akhmetzhanova⁴, Andrey M. Petrov⁵

^{1,2,3,4,5}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

¹nguyenvandung1996kchy@gmail.com

²a.u.dunin@yandex.ru

³dushkin.pavel@gmail.com

⁴onti@nich.madi.ru

⁵psiholiric@inbox.ru

Abstract. The results of a computational study of the working process of a modern spark ignition engine when operating as part of a combined power plant (CPP) of a passenger car moving along the driving cycle are presented. Two-cylinder and four-cylinder engines with a compression ratio $\varepsilon = 9.9$ were considered as objects of research. The study was carried out under the condition that the excess air coefficient $\alpha = 1$ was maintained for both spark ignition engines using both gasoline and ammonia. The results show that the use of CPP makes it possible to reduce engine displacement and reduce fuel consumption over the driving cycle by 18%. A decrease in the amount of heat supplied to the cycle with fuel at medium and high load modes was noted while ensuring the total specified power of the CPP required for vehicle movement. This eliminates the need to increase the fuel supply on board the vehicle when switching from gasoline to ammonia, but there is a need to select a rational combination of the required power of a spark ignition engine and an electric motor.

Keywords: spark ignition engine, alternative fuel, ammonia, Combination Power System.

For citation: Nguyen V.D., Dunin A. Yu., Dushkin P. V., Akhmetzhanova E. U., Petrov A. M. A Solution for Converting Gasoline Engines to Use Ammonia with A Combination Power System to reduce emissions of carbon compounds from exhaust gases. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024. No. 2 (40).

Введение

Стремление к снижению отрицательного воздействия транспорта на окружающую среду заставляет автопроизводителей совершенствовать существующие направления и искать новые пути к снижению доли

токсичных веществ в отработавших газах (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС). В исследованиях, которые проводятся на протяжении десятилетий, основное внимание уделяется совершенствованию систем впрыскивания топлива и наддува, применению электронного управления и нейтрализации ОГ. Одновременно с совершенствованием конструкции ДВС ставится задача расширения числа моторных топлив при частичном или полном переходе на альтернативные топлива.

Привлекательность большинства альтернативных топлив связывают с их возобновляемостью и наличием в молекуле кислорода (спирты и эфиры). За последние годы к этому прибавилась идея применения топлив, химические формулы которых характеризуются отсутствием углерода или его относительно малым содержанием (H_2 , гремучий газ HNO , NH_3 , CH_4 , ДМЭ, диэтиловый эфир ДЭЭ и т.д.). Такой подход, по мнению его сторонников [1], значительно сокращает или полностью исключает присутствие в ОГ углеродосодержащих соединений: диоксида углерода CO_2 , оксида углерода CO , углеводородов CH и дисперсных частиц.

В таблице 1 приведено сравнение физико-химических свойств, оказывающих влияние на рабочий процесс ДВС, для некоторых альтернативных топлив со свойствами традиционных топлив.

Таблица 1

Физико-химические свойства некоторых топлив, оказывающие влияние на рабочий процесс ДВС [2-4], [8-19]

Свойства	Бензин	Метан	Водород	Аммиак
Низшая теплота сгорания H_u , МДж/кг	44,5	50,05	120	18,8
Отношение H_u/l_0 , МДж/кг	2,99	2,88	3,45	3,05
Плотность при 0,1 МПа и 298 К, кг/м ³	736	0,66	0,08	0,73
Скрытая теплота испарения, кДж/кг	348,7	511	455	1370
Температура самовоспламенения, К	503	859	773 ... 850	930
Октановое число	90 ... 98	120	> 100	130
Массовое содержание углерода, %	85,5	75	—	—
Массовое содержание водорода, %	14,5	25	100	17,7
Массовое содержание азота, %	—	—	—	82,3

Все представленные в табл. 1 альтернативные топлива обладают более низким массовым содержанием углерода по сравнению с традиционными топливами. У H_2 и NH_3 этот показатель равен нулю.

Аммиак легче воздуха и хорошо растворяется в воде, что обеспечивает контроль его утечки, избегая риска пожара или взрыва. Низкая вязкость аммиака способствует более качественному, относительно бензина, распыливанию и смесеобразованию с воздухом [4, 9].

За последние несколько десятилетий реакции окисления NH_3 хорошо изучены. Этому способствовало его применение в качестве топлива и для снижения содержания оксидов азота в ОГ дизелей применением в качестве восстановителя при селективной нейтрализации [20-23]. Возможное использование аммиака с водородом, полученным при разложении аммиака (рис. 1).

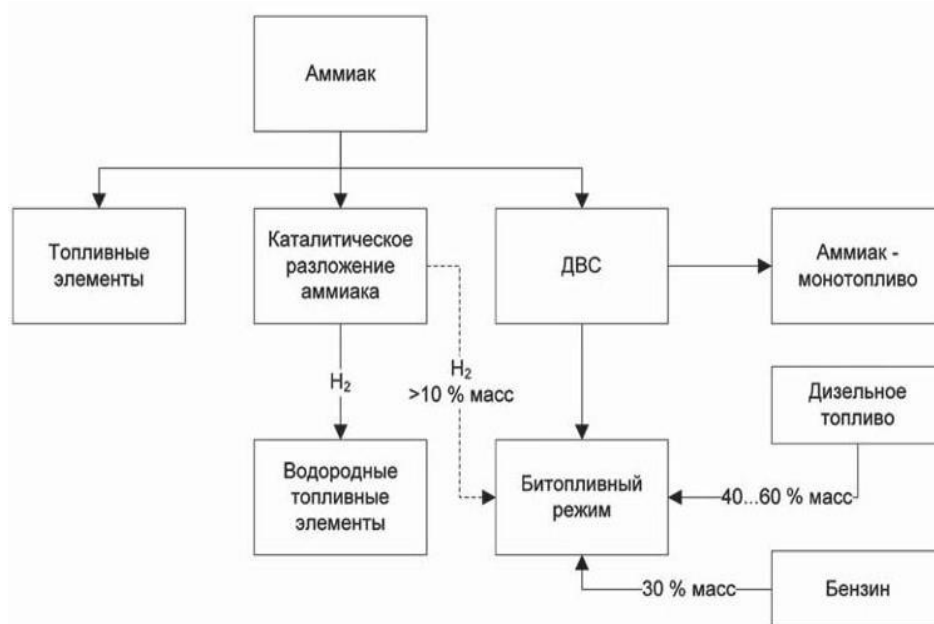


Рис. 1. Возможное использование аммиака

Объект исследования и его математическая модель

Дальнейшее повышение эффективности применения аммиака связано с его применением в двигателе с искровым зажиганием (ДсИЗ), работающим в

составе с комбинированной энергетической установкой (КЭУ). При этом КЭУ обладают рядом преимуществ:

- движение автомобиля с выключенным ДВС в жилых зонах (до 40 км/ч);
- реализация функции Start&Stop;
- подключаемый привод задней оси без механической связи;
- расширение диапазона работы ДсИЗ при $\alpha \approx 0,99$ без кратковременного перехода на богатые смеси при интенсивных разгонах автомобиля;
- повышение степени сжатия ДсИЗ при применении циклов Миллера и Аткинсона на ДВС без наддува.

Применение КЭУ позволяет уменьшить рабочий объем ДВС, например за счет сокращения числа цилиндров двигателя, и обеспечить тем самым его работу на режимах с большим открытием дроссельной заслонки, что снизит работу газообмена.

Возникает необходимость выбора рационального сочетания требуемой мощности ДсИЗ и электрических машин (генератор и электродвигатель), емкости аккумуляторной батареи, связанных с массой транспортного средства. С этой целью разработана модель работы КЭУ в составе транспортного средства на режимах ездового цикла.

Схема моделируемой КЭУ представлена на рис. 2.

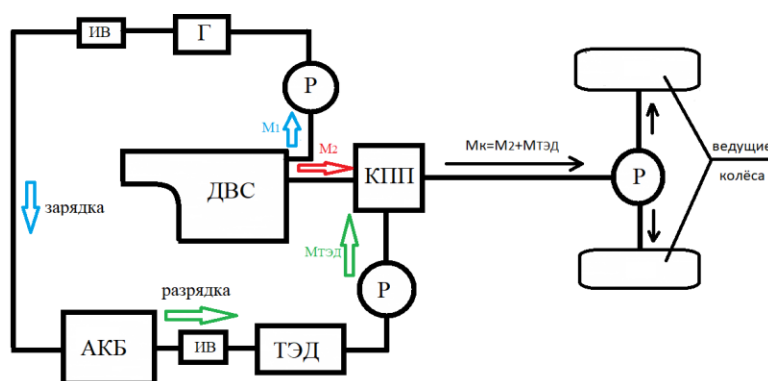


Рис. 2. Предлагаемая схема автомобиля с комбинированной энергетической установкой: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; КП – коробка передач; Р – редуктор; ЭД – асинхронный электродвигатель; ИВ – инвертор; Г – асинхронный генератор; АБ – аккумуляторная батарея

В предложенной КЭУ работа ДВС осуществляется постоянно. Электродвигатель (ЭД) подключается механически (через редуктор) к трансмиссии и электрически (через инвертор) к аккумуляторной батарее (АКБ) при нехватке крутящего момента ДВС для преодоления сопротивления. Генератор (Г) подключают к трансмиссии для поддержания требуемого уровня зарядки АКБ, с которой он связан через инвертор.

Описание разработанной математической модели рабочего цикла ДсИЗ и проверка ее адекватности по экспериментальным данным работы ДВС на трёх видах топлива (бензине, аммиаке и водороде) приведены в работе [5].

Для описания математической модели асинхронной электрической машины была принята упрощённая Г-образная схема замещения АД (рис. 3).

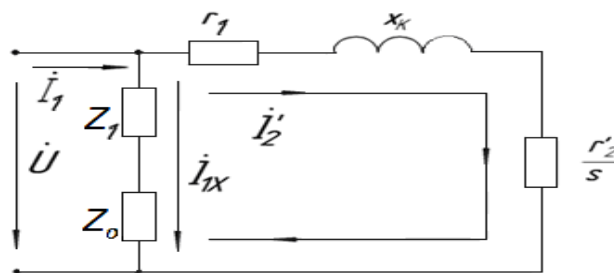


Рис. 3. Г-образная схема замещения АД:

Z_1 и r_1 – комплексное и активное сопротивления обмотки статора, Ом; r_2' – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом; x_k – индуктивное сопротивление обмоток для режима короткого замыкания (при неподвижном роторе), Ом; Z_0 – комплексное сопротивление поперечной ветви для Т-образной схемы замещения АД, Ом; s – скольжение ротора; U – напряжение питания, В; I_{1x} – ток холостого хода, А; I_2' – ток в обмотке ротора, приведенный к обмотке статора, А; I_1 – потребляемый ток, А; r_2' – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, А.

В Г-образной схеме замещения АД электромагнитная связь заменена на электрическую [6]. Параметры цепи ротора приводятся к параметрам цепи статора. В качестве примера на рис. 4 представлены рассчитанные механические характеристики электрических асинхронных двигателей (электродвигательные и генераторные характеристики). Режим

электрического двигателя поддерживается в диапазоне частот вращения ротора $0 \dots 1500 \text{ мин}^{-1}$, а генераторный режим от 750 мин^{-1} и выше (рис. 4).

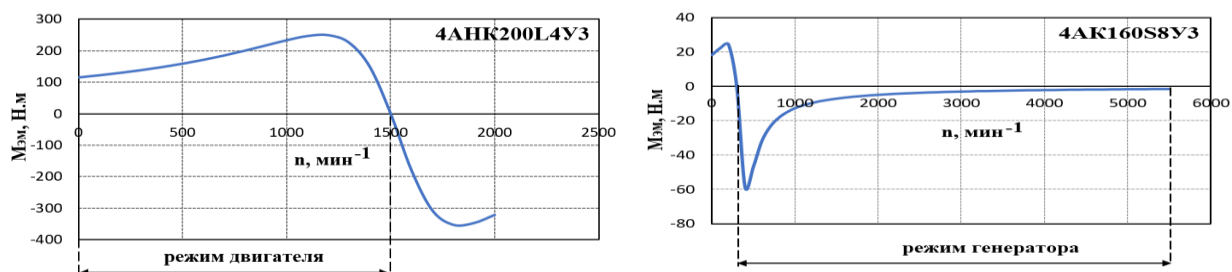


Рис. 4. Электромагнитные моменты электрической машины на разных режимах

Для проверки адекватности модели асинхронного электродвигателя использованы данные, опубликованные в [7]. Сопоставление расчетных данных и результатов, приведенных в [7], показаны на рис. 5-7, где: P_1 – потребляемая тяговым электродвигателем (ТЭД) мощность (на выходе инвертора); I_1 – Фазный действующий ток статора; η – КПД ТЭД.

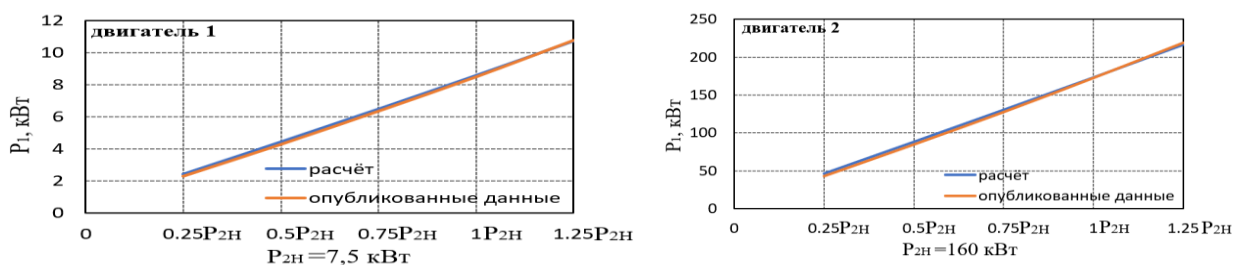


Рис. 5. Зависимость P_1 от $f(P_{2n})$

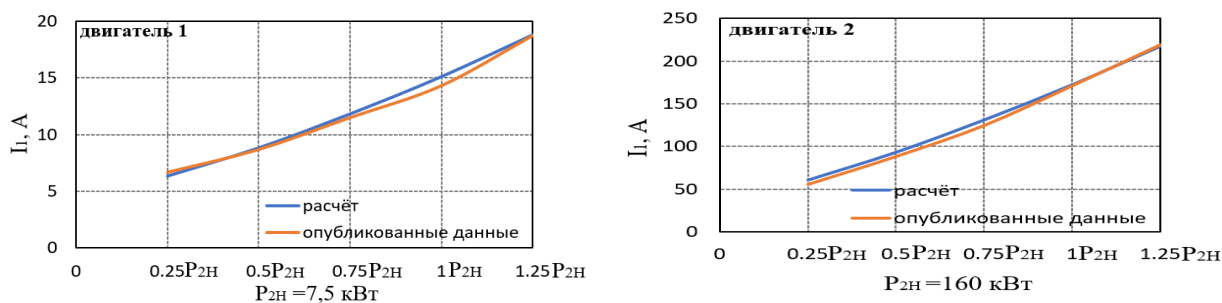


Рис. 6. Зависимость I_1 от $f(P_{2n})$

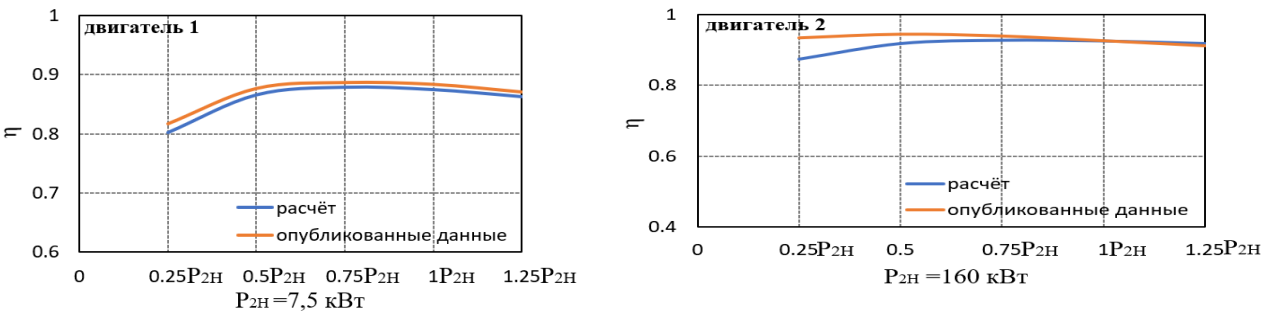


Рис. 7. Зависимость η от $f(P_{2H})$

На рисунках 5-7 представлены рабочие характеристики, полученные для двух электрических двигателей с различными номинальными значениями потребляемых мощностей P_{2H} : «двигатель 1» – $P_{2H} = 7,5 \text{ кВт}$ и «двигатель 2» – $P_{2H} = 160 \text{ кВт}$. Как видно из рисунков, математическая модель, полученная на основе упрощённой Г-образной схемы замещения обеспечивает достаточно высокую сходимость результатов (рис. 3). Так для I_1 наибольшее расхождение составило 5,3 %, а для η – 6,4 %.

Расчетное исследование влияния состава комбинированной энергетической установки на показатели работы ДсИЗ

Исследования влияния комплектации КЭУ на показатели ДсИЗ проведены для двух вариантов, представленных в табл. 2, где указаны основные параметры энергетических установок, включая их массы.

Таблица 2

Варианты КЭУ и параметры их энергетических установок

Вариантное сочетание силовых агрегатов			
Вариант	ДВС	ТЭД	Г
1	4Ч 7,6/7	4АНК160S4Y3	4AK160S8Y3
2	2Ч 7,6/7	4АНК200L4Y3	4AK200L8Y3
двигатель внутреннего сгорания (ДВС)			
1	ДсИЗ	4Ч 7,6/7	2Ч 7,6/7
2	Рабочий объем, см ³	1289	649
3	Диаметр цилиндра, мм	76	76
4	Ход поршня, мм	70	70
5	Степень сжатия	9,9	9.9
6	Номинальная мощность, кВт	47,5	22

7	Крутящий момент, Нм	94,8	44
8	Масса, кг	127	63,5
тяговой электродвигатель (ТЭД)			
1	Модель	4АНК160S4Y3	4АНК200L4Y3
2	Ном. напряжение питания статора, В	200	200
3	Ном. частота напряжения питания статора, Гц	50	50
4	Число пар полюсов	4	4
5	Синхронная частота вращения вала ротора, мин ⁻¹	1500	1500
6	Ном. мощность на валу ротора, кВт	14	45
7	КПД	0,865	0,9
8	Скольжение	5	3,5
9	Масса, кг	140	315
генератор (Г)			
1	Модель	4АК160S8Y3	4АК200L8Y3
2	Ном. напряжение питания статора, В	220	220
3	Ном. частота напряжения питания статора, Гц	50	50
4	Число пар полюсов	8	8
5	Синхронная частота вращения вала ротора, мин ⁻¹	750	750
6	Ном. мощность на валу ротора, кВт	5,5	18,5
7	КПД	0,8	0,86
8	Скольжение	6,5	3,5
9	Масса, кг	170	320
Масса КЭУ, кг		437	698,5

Для расчетных исследований транспортного средства с КЭУ был выбран Новый Европейский ездовой цикл (NEDC – New European Driving Cycle) длительностью 1220 с (рис. 8).

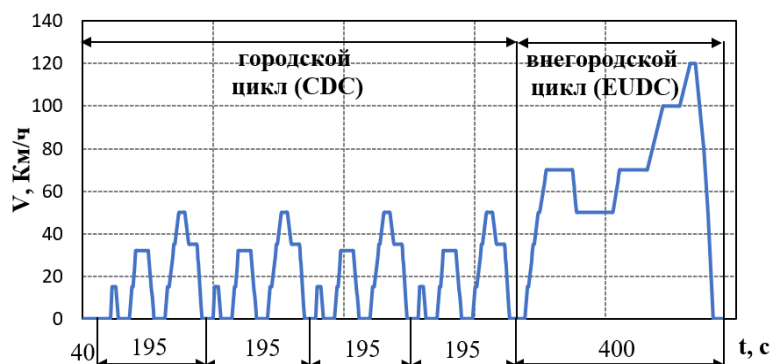


Рис. 8. Новый Европейский ездовой цикл (NEDC)

Из таблицы 2 видно, что для обеспечения работы ДсИЗ в составе автомобиля, движущегося по выбранному ездовому циклу (рис. 8), с учетом подзарядки аккумуляторной батареи генератором применение двигателя 2Ч 7,6/7 по сравнению с 4Ч 7,6/7 увеличивает массу КЭУ (с 437 до 698,5 кг) и всего транспортного средства. Это связано с необходимостью увеличения мощностей генератора и электродвигателя при сохранении неизменной емкости аккумуляторной батареи. Мощность энергетической установки, приведенная к ее массе, выше у ДВС по сравнению с электродвигателем.

Снижение числа цилиндров и повышение массы КЭУ определяет работу ДсИЗ с большими значениями коэффициента использования мощности K (рис. 9, 10). Коэффициент использования мощности определяет отношении текущей величины эффективной мощности к ее величине, получаемой при полностью открытой дроссельной заслонки при данной частоте вращения коленчатого вала и коэффициенте избытка воздуха.

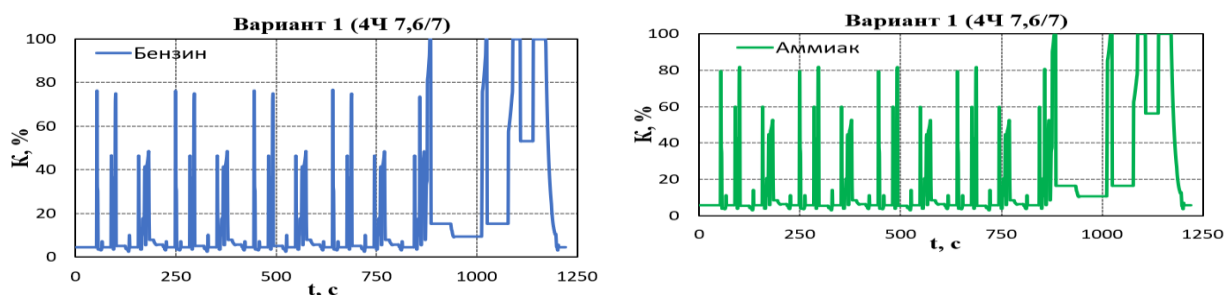


Рис. 9. Коэффициент использования мощности ДсИЗ 4Ч 7,6/7 при его работе на бензине и аммиаке

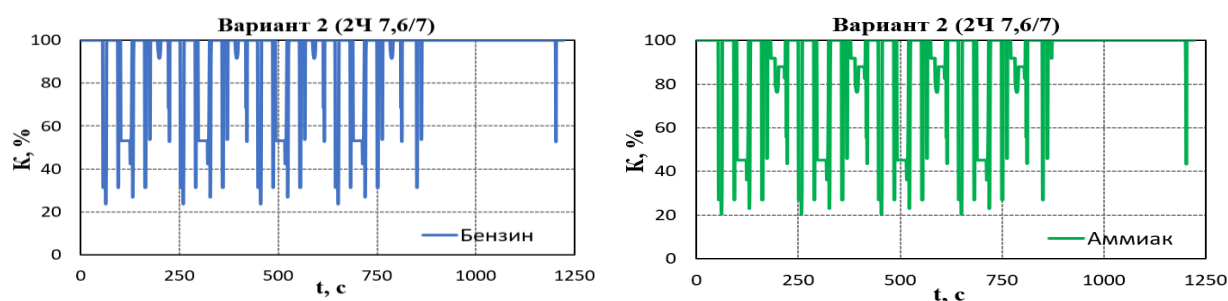


Рис. 10. Коэффициент использования мощности ДсИЗ 2Ч 7,6/7 при его работе на бензине и аммиаке

Значения K мало отличаются друг от друга (рис. 9, 10) при переводе ДсИЗ с бензина на аммиак. При этом, из-за увеличения октанового числа с 92 до 130 доля детонирующего топлива dx снижается (рис. 11, 12). Во время моделирования угол опережения зажигания оставался неизменным на всех режимах работы ДсИЗ и составлял 22° ПКВ до ВМТ. Распознавание детонации в математической модели рабочего цикла ДсИЗ проводилась с применением формулы Дауда и Ейза [24].

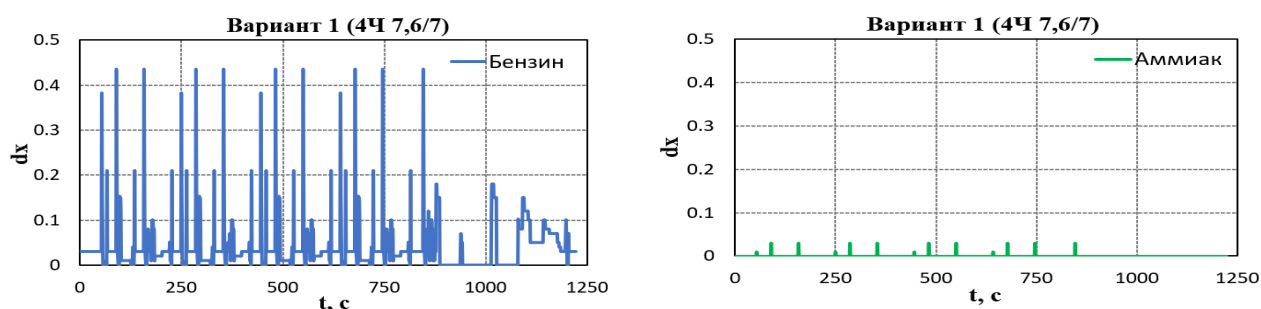


Рис. 11. Доля детонирующего топлива ДсИЗ 4Ч 7,6/7 при его работе на бензине и аммиаке

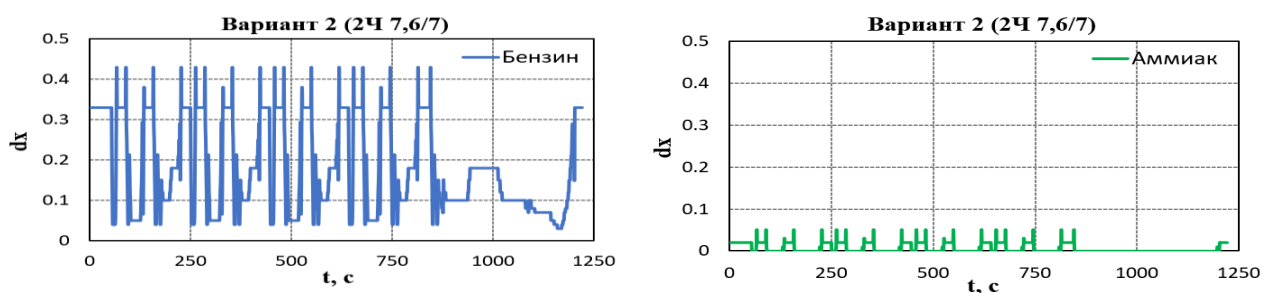


Рис. 12. Доля детонирующего топлива ДсИЗ 2Ч 7,6/7 при его работе на бензине и аммиаке

Высокие значения dx при работе двигателя 4Ч 7,6/7 на бензине (рис. 11) объясняются увеличением нагрузки (рис. 9) на режимах движения автомобиля, масса которого возросла с учетом применения КЭУ (масса штатного ДсИЗ 127 кг, масса КЭУ с ДсИЗ 437 кг). При применении ДсИЗ с меньшим числом цилиндров (2Ч 7,6/7) и связанным с этим увеличением массы КЭУ до 698,5 кг доля детонирующего топлива возрастает на большем

числе режимов ездового цикла (рис. 11 и 12). В случае с аммиаком этот рост менее сказывается на работе двигателя из-за малых значений Δx .

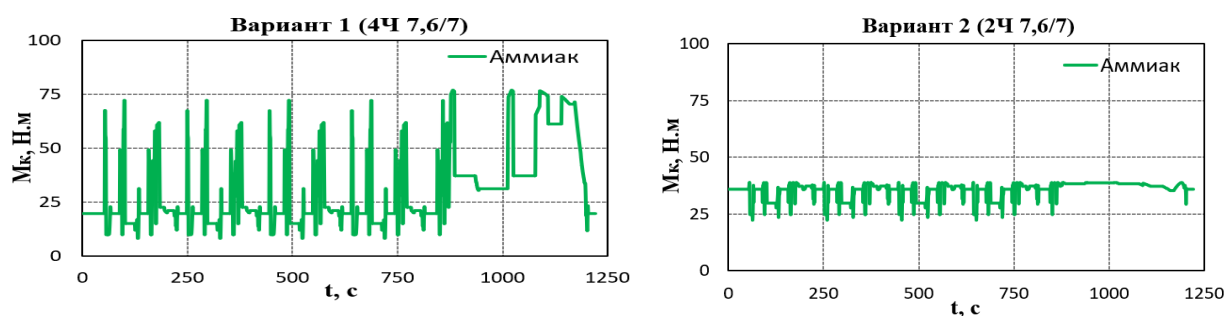


Рис. 13. Эффективный крутящий момент M_k ДсИЗ при его работе на аммиаке

Работа ДсИЗ 2Ч 7,6/7 в составе КЭУ с более высокими значениями K по сравнению с 4Ч 7,6/7 снижает потери на газообмен и увеличивает механический КПД. Как результат – эффективный КПД η_e двухцилиндрового двигателя выше, чем у четырехцилиндрового на режимах ездового цикла (рис. 14).

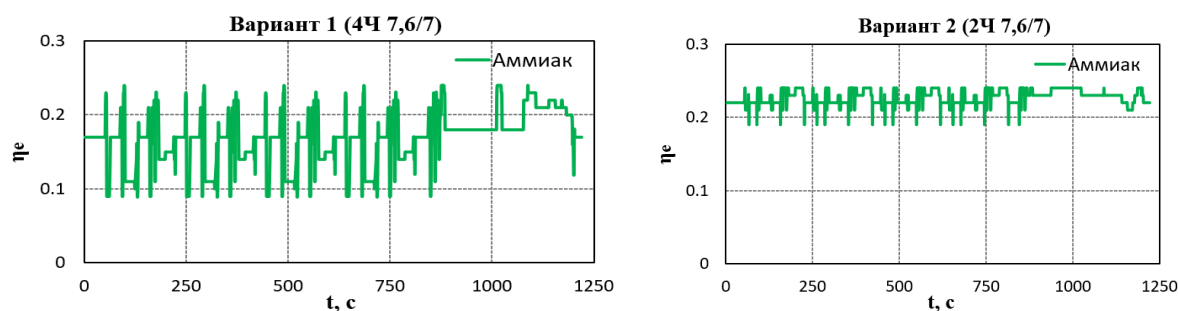


Рис. 14. Эффективный КПД ДсИЗ η_e при работе на аммиаке

Повышение η_e и снижение числа цилиндров при работе в составе КЭУ обеспечивают уменьшение расхода топлива ДсИЗ в ездовом цикле (рис. 14). Это актуально в случае применения энергоносителей с низкими величинами H_u , так как несколько нивелирует необходимость повышения количества топлива на борту транспортного средства из-за неминуемого повышения его расхода, например, при переходе с бензина на аммиак (рис. 15).

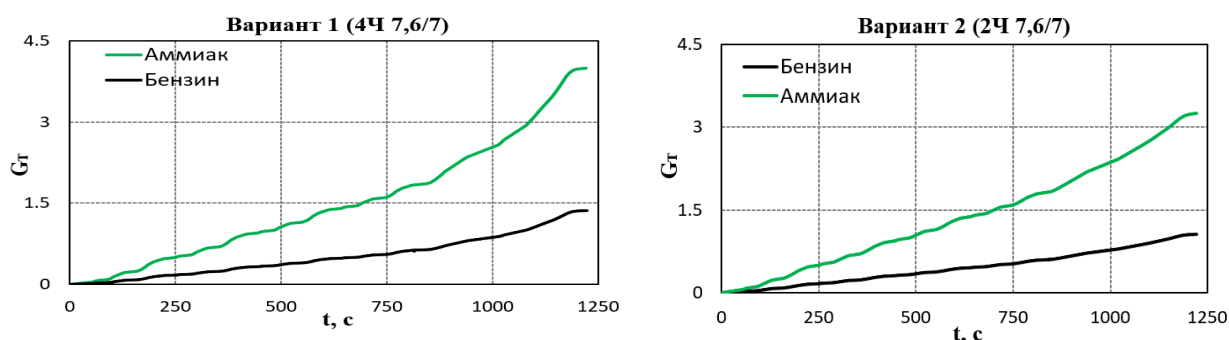


Рис. 15. Расход топлива ДсИЗ при его работе на бензине и аммиаке за ездовой цикл

Отмеченная на рис. 13 нехватка крутящего момента у 2Ч 7,6/7 по сравнению с 4Ч 7,6/7 компенсируется включением в работу тягового электродвигателя (рис. 16). Более частое включение электродвигателя увеличивает долю времени работы генератора для заряда аккумуляторной батареи, что дополнительно увеличивает коэффициент К для ДсИЗ 2Ч 7,6/7.

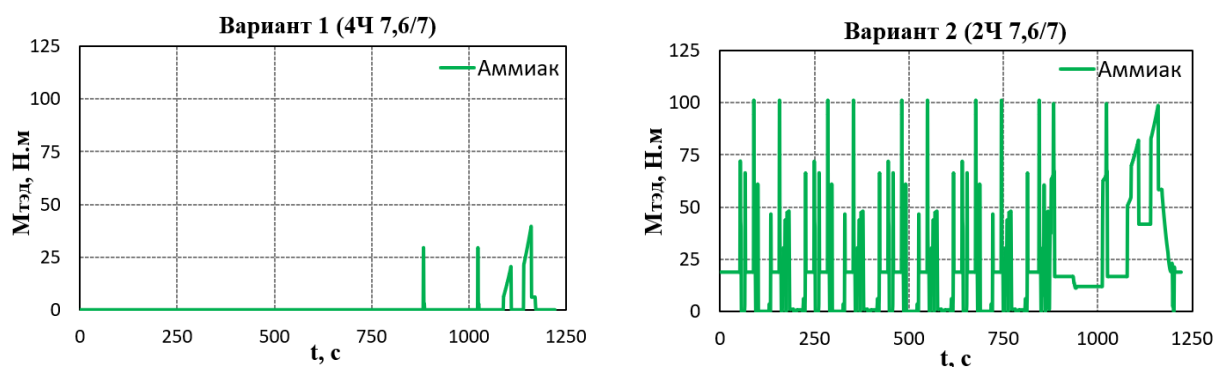


Рис. 16. Крутящий момент ТЭД при работе ДсИЗ на аммиаке

Выводы

1. Применение аммиака обеспечивает существенное снижение содержания углерода в отработавших газах двигателя с искровым зажиганием (ДсИЗ). Аммиак обладает более высокими антидетанационными свойствами (октановое число 130), а условия его хранения не столь требовательны по безопасности как у водорода.

2. Применение аммиака в ДсИЗ рациональнее осуществлять в составе комбинированной энергетической установки. Это позволяет применить ДсИЗ

с меньшим числом цилиндров (переход от 4Ч 7,6/7 к 2Ч 7,6/7) при сохранении скоростных и динамических качеств транспортного средства.

3. Сокращение числа цилиндров и снижение механических потерь ДсИЗ обеспечивают увеличение эффективного КПД (среднее значение η_e возросло на 29%), что, в сочетании с малой величиной низшей теплоты сгорания, несколько нивелирует необходимость повышения количества топлива на борту транспортного средства (расход топлива за ездовой цикл сократился на 18%).

Список источников

1. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / А. А. Александров, И. А. Архаров, В. В. Багров [и др.] ; Под редакцией А. А. Александрова, В. А. Маркова. – Москва : ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012. – 790 с. – ISBN 978-5-7013-0140-3. – EDN VCHZNB.
2. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях / Марков В. А. [и др.]. – Москва : Инженер, 2011. – 534 с. – (Банк знаний XXI века). – ISBN 978-5-7013-0120-5. – EDN QNYBFP.
3. Марков, В. А. Сравнительная оценка альтернативных топлив для дизельных двигателей / В. А. Марков, Е. В. Бебенин, Е. Ф. Поздняков // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 5(35). – С. 24-29. – EDN RBTZBL.
4. Легасов, В.А. Водородная энергетика / В.А. Легасов // Природа. – 1977. – № 3. – С. 3-17.
5. Моделирование рабочего процесса двигателя с искровым зажиганием, питаемого безуглеродным топливом / В. З. Нгуен, А. Ю. Дунин, Э. У. Ахметжанова [и др.] // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2023. – № 4(38). – EDN XMIVQD.
6. Гридин, В. М. Расчет параметров и характеристик асинхронных двигателей [Электронный ресурс] : методические указания к выполнению домашнего задания по курсу "Электротехника и электроника" / В. М. Гридин, 2011. – С. 11-13.
7. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин : Учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению электротехника, электромеханика и энергетика / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко; Под ред. О. Д. Гольдберга. – 2. изд., перераб. – Москва : Высш. шк., 2001. – 430 с. ISBN 5-06-003842-4
8. Meulenbelt, J. Ammonia / J. Meulenbelt // Medicine. – 2012. – Vol. 40, No. 2. – P. 94–95. – DOI 10.1016/j.mpmed, 2011.11.006.
9. Sarafriz, M. M. Sustainable three-stage chemical looping ammonia production (3CLAP) process / M. M. Sarafriz, F. C. Christo // Energy Conversion and Management. – 2021. – Vol. 229. – Art. No. 113735. – DOI 10.1016/j.enconman.2020.113735.

10. Frigo, S. Analysis of the behaviour of a 4-stroke Si engine fuelled with ammonia and hydrogen / S. Frigo, R. Gentili // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2013. – Vol. 38(3). – P. 1607-1615. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2012.10.114.
11. Bell, T. E. H₂ Production via Ammonia Decomposition Using Non-Noble Metal Catalysts: A Review / T. E. Bell, L. Torrente-Murciano // *Topics in Catalysis*. – 2016 – Vol. 59(15-16). – P. 1438-1457. – DOI 10.1007/s11244-016-0653-4.
12. Klerk, A. Ammonia for Hydrogen Storage: Challenges and Opportunities / A. Klerk, C. H. Christensen, J. K. Nørskov, T. Vegge // *Journal of Materials Chemistry*. – 2008. – Vol. 18(20). – P. 2304-2310. – DOI 10.1039/B720020J.
13. Ferguson, C. R. Internal combustion engines: applied thermosciences / C. R. Ferguson // New York: John Wiley & Sons; 2016. – 546 p.
14. Ryu, K. Performance enhancement of ammonia-fueled engine by using dissociation catalyst for hydrogen generation / K. Ryu, G. E. Zacharakis-Jutz, S. C. Kong // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – Vol. 39(5). – P. 2390-2398. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2013.11.098.
15. Ryu, K. Effects of gaseous ammonia direct injection on performance characteristics of a spark-ignition engine / K. Ryu, G. E. Zacharakis-Jutz, S. C. Kong // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 116. – P. 206-215. – DOI 10.1016/j.apenergy.2013.11.067.
16. Cornelius, W. Ammonia as an engine fuel / W. Cornelius, L. W. Huellmantel, H. R. Mitchell // *SAE Technical Paper*. – 1965. – Art. No. 650052. – DOI 10.4271/650052.
17. Starkman, E. S. Ammonia as a Spark Ignition Engine Fuel: Theory and Application / E. S. Starkman, H. K. Newhall, R. Sutton, T. Maguire, L. Farbar // *SAE Technical Paper*. – 1966. – Art. No. 660155. – DOI 10.4271/660155.
18. Comotti, M. Hydrogen generation system for ammonia-hydrogen fuelled internal combustion engines / M. Comotti, S. Frigo // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2015. – Vol. 40(33). – P. 10673-10686. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2015.06.080.
19. Morch, C. S. Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: Engine performance and analysis of a proposed fuel system / C. S. Morch, A. Bjerre, M. P. Gottrup, S. C. Sorenson, J. Schramm // *Fuel*. – 2011. – Vol. 90(2). – P. 854-864. – DOI 10.1016/j.fuel.2010.09.042.
20. Pozzana, G. A. Hybrid Vehicle Powered by Hydrogen and Ammonia / G. Pozzana, N. Bonfanti, S. Frigo, N. Doveri et al. // *SAE Technical Paper*. – 2012. – Art. No. 2012-32-0085. – DOI 10.4271/2012-32-0085.
21. Cremer, M. A. Development and implementation of reduced chemistry for computational fluid dynamics modeling of selective non-catalytic reduction / M. A. Cremer, C. J. Montgomery, D. H. Wang, M. P. Heap, J. Chen // *Proc. Combust. Inst.* – 28 (2000). – P. 2427-2434.
22. Charles, L. Experimental study on ammonia/hydrogen/air combustion in spark ignition engine conditions *Fuel* / L. Charles, B. Pierre, C. Francesco, M. Christine -Rousselle // 269 (2020). – P. 117448.
23. Dauaud, A. M. Four – Octane – Number Method for Predicting the Anti-Knock Behavior of fuels and Engines / Dauaud A. M., Eyzat P. // *SAE Transactions*. – 1978. – P. 780080. – <https://doi.org/10.4271/780080>.

References

1. Aleksandrov A.A., Arkharov I.A., Bagrov V.V., Gayvoronskiy A.I., Grekhov L.V., Devyanin S.N., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Al'ternativnyye topliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya* (Alternative fuels for internal combustion engines), Moscow: OOO NITS «Inzhener», OOO «Oniko-M», 2012, 790 p.
2. Markov V.A., Devyanin C.N., Semenov V.G., and etc. *Ispol'zovaniye rastitel'nykh masel i topliv na ikh osnove v dizel'nykh dvigatelyakh* (Use of vegetable oils and fuels based on them in diesel engines), Moscow, Inzhener, 2011, 534 p.
3. Markov V.A., Bebenin Ye.V., Pozdnyakov Ye.F. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2013, no. 5(35), pp. 24-29.
4. Legasov V.A. *Priroda*, 1977, no 3, pp. 3-17.
5. Nguyen V.Z., Dunin A.YU., Akhmetzhanova E.U., Petrov A.M., Konyushkov D.S. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2023, no. 4(38).
6. Gridin V.M. *Raschet parametrov i kharakteristik asinkhronnykh dvigateley* (Calculation of parameters and characteristics of asynchronous motors)[Electronic resource], 2011, pp. 11-13.
7. Goldberg O. D. Gurin Ya.S., Sviridenko I.S. *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin* (Electrical machine design), Moscow, Vyssh. shk., 2001, 430 pp.
8. Meulenbelt, J. *Medicine*, 2012, Vol. 40, no. 2, pp. 94–95. DOI 10.1016/j.mpmed, 2011.11.006.
9. Sarafraz M.M., Christo F.C. *Energy Conversion and Management*, 2021, vol. 229, art. no. 113735. DOI 10.1016/j.enconman.2020.113735.
10. Frigo S, Gentili R. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, vol. 38(3), pp. 1607-1615. DOI 10.1016/j.ijhydene.2012.10.114.
11. Bell T.E.,Torrente-Murciano L. *Topics in Catalysis*, 2016, vol. 59(15-16), pp. 1438-1457. DOI 10.1007/s11244-016-0653-4.
12. Klerk A., Christensen C.H., Nørskov J.K., Vegge T. *Journal of Materials Chemistry*, 2008, vol. 18(20), P. 2304-2310. – DOI 10.1039/B720020J.
13. Ferguson C.R. *Internal combustion engines: applied thermosciences*, New York, John Wiley & Sons, 2016, 546 p.
14. Ryu K., Zacharakis-Jutz G.E., Kong S.-C. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39(5), pp. 2390-2398. DOI 10.1016/j.ijhydene.2013.11.098.
15. Ryu K., Zacharakis-Jutz G.E., Kong S.-C. *Apple Energy*, 2014, vol. 116, pp. 206-215. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.11.067.
16. Cornelius W., Huellmantel L.W., Mitchell H.R. *SAE Technical Paper*, 1965, art. no. 650052. DOI 10.4271/650052.
17. Starkman E.S., Newhall H.K., Sutton R., Maguire T., Farbar L. *SAE Technical Paper*, 1966, art. no. 660155. DOI 10.4271/660155.
18. Comotti M., Frigo S. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, vol. 40(33), pp. 10673-10686. DOI 10.1016/j.ijhydene.2015.06.080.
19. Morch C.S., Bjerre A., Gottrup M.P., Sorenson S.C., Schramm J. *Fuel*, 2011, vol. 90(2), pp. 854-864. DOI 10.1016/j.fuel.2010.09.042.

20. Pozzana G., Bonfanti N., Frigo S., Doveri N. et al. *SAE Technical Paper*, 2012, art. no. 2012-32-0085. DOI 10.4271/2012-32-0085.
21. Cremer M.A., Montgomery C.J., Wang D.H., Heap M.P., Chen J. *Proc. Combust. Inst.*, 28 (2000), pp. 2427-2434.
22. Charles L., Pierre B., Francesco C., Christine-Rousselle M., 2020, no. 269, pp. 117448.
23. Cremer M.A., Montgomery C.J., Wang D.H., Heap M.P., Chen J. *Proc. Combust. Inst.*, vol. 28 (2000), pp. 2427-2434.
24. Dauaud A.M., Eyzat P. *SAE Transactions*, 1978, 780080
<https://doi.org/10.4271/780080>.

Рецензент: Л.Н. Голубков, д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Нгуен Ван Зунг, аспирант, МАДИ.

Дунин Андрей Юрьевич, д-р техн. наук, доц., МАДИ.

Душкин Павел Витальевич, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Ахметжанова Эльмира Умяровна, аспирант, МАДИ.

Петров Андрей Михайлович, аспирант, МАДИ.

Information about the authors

Nguyen Van Dung, postgraduate, MADI.

Dunin Andrey Yu., Doctor of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Dushkin Pavel L., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Akhmetzhanova Elmira U., postgraduate, MADI.

Petrov Andrey M., postgraduate, MADI.

Статья поступила в редакцию 28.05.2024; одобрена после рецензирования 06.06.2024; принята к публикации 17.06.2024.

The article was submitted 28.05.2023; approved after reviewing 06.06.2024; accepted for publication 17.06.2024.