

Научная статья
УДК 621.443

Оценка показателей двигателя с искровым зажиганием при его работе на аммиаке

Ван Зунг Нгуен¹, Андрей Юрьевич Дунин², Эльмира Умяровна Ахметжанова⁴,
Андрей Михайлович Петров⁴, Евгения Максимовна Филиппова⁵

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

¹nguyenvandung1996kchy@gmail.com

²a.u.dunin@yandex.ru

³onti@nich.madi.ru

⁴psiholiric@inbox.ru

⁵dasistzhenia@yandex.ru

Аннотация. В данной работе представлены характеристики двигателей с искровым зажиганием 4Ч 7,6/7 и 4ЧН 7,6/7 (ДсИЗ 4Ч 7,6/7 и 4ЧН 7,6/7) при переводе с бензина на аммиак. Аммиак рассматривается как одно из перспективных топлив, не содержащих углерод, благодаря его низкой стоимости, практически неограниченной сырьевой базе, доступности и относительной простоте хранения при нормальных условиях. При полном сгорании аммиака образуется только один токсичный компонент – NO_x , причём в незначительных количествах, так как температуры горения аммиачно-воздушных смесей ниже, чем у бензо-воздушных. Высокое октановое число ($\text{ОЧ} = 130$) делает возможным применение аммиака в двигателях с искровым зажиганием с большей степенью сжатия или с высоким давлением наддува. В качестве объектов расчетного исследования выбраны показатели двигателей с искровым зажиганием без наддува (4Ч 7,6/7) и с наддувом (4ЧН 7,6/7). Анализ полученных результатов показывает, что переход с бензина на аммиак и сопутствующее этому введение наддува обеспечило увеличение максимального крутящего момента M_e на 15,8 %, максимальной мощности N_e – 11,3 % (по сравнению с работой 4Ч 7,6/7 на бензине по внешней скоростной характеристике). При этом удельный расход аммиака почти в 2,5 раза выше, чем у бензина. Это обусловлено меньшей объемной плотностью энергии и меньшей теплотворной способностью аммиачно-воздушной смеси по сравнению с бензином. Увеличение суммарного количества NO_x в ОГ при сжигании аммиака по сравнению с бензином связано с более высокой максимальной температурой цикла. Доля детонирующего топлива бензина существенно выше, чем у аммиака. Из-за высокой температуры самовоспламенения и низкой ламинарной скорости горения аммиака оптимальный угол опережения зажигания (УОЗ) значительно увеличивается. Так при частоте вращения коленчатого вала $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,0$ УОЗ составил 60° ПКВ до ВМТ при полностью открытой дроссельной

заслонке. Повышение значения степени сжатия и совместное применение наддува с циклом Миллера способствует улучшению мощностных и экономических показателей двигателя с искровым зажиганием при его работе на аммиаке.

Ключевые слова: двигатель с искровым зажиганием (ДсИЗ), аммиак, детонация, степень сжатия, наддув, цикл Миллера.

Для цитирования: Нгуен В.З., Дунин А.Ю., Ахметжанова Э.У., Петров А.М., Филиппова Е.М. Оценка показателей двигателя с искровым зажиганием при его работе на аммиаке // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2024. № 4 (42).

Original article

Assessment of the performances of a spark ignition engine when operating on ammonia

Van Dung Nguyen¹, Andrey Yu. Dunin², Elmira U. Akhmetzhanova³, Andrey M. Petrov⁴,
Eugenia M. Filippova⁵

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

¹nguyenvandung1996kchy@gmail.com

²a.u.dunin@yandex.ru

³onti@nich.madi.ru

⁴psiholiric@inbox.ru

⁵dasistzhenia@yandex.ru

Abstract. This study presents the characteristics of a spark-ignition internal combustion engines 4CH 7.6/7 and 4CHN 7.6/7 (SI engines 4CH 7.6/7 and 4CHN 7.6/7) when converting from gasoline to ammonia. Ammonia is a promising fuel due to its low cost, unlimited raw material base, availability and ease of storage under normal conditions. With complete combustion of ammonia, only one harmful component is formed - NO_x, and in small quantities, since the combustion temperatures of ammonia-air mixtures are relatively low and there are practically no products containing carbon compounds, which are the main causes of the greenhouse effect. High octane number (RON=130) makes ammonia suitable for engines with high compression ratios or high boost pressure to improve engine efficiency, as its resistance to detonation is higher than that of gasoline. The results show that when converting from gasoline to ammonia at the external speed characteristic (ESC), the maximum torque M_e on the ESC increases by 15.8 %, the maximum power N_e on the ESC increases by 11,3 % (compared to the operation of 4CH 7.6/7 on gasoline in terms of ESC). The specific fuel consumption of ammonia is almost 2.5 times higher than that of gasoline. This is due to the lower volumetric energy density and lower calorific value of the ammonia-air mixture compared to gasoline. The increase in the total amount of NO_x in the exhaust gases during combustion of ammonia compared to

gasoline is due to the higher maximum temperature of the cycle. The proportion of detonating fuel in gasoline is significantly higher than that of ammonia. Due to the high auto-ignition temperature and low laminar combustion rate of ammonia, the optimal ignition timing is 60° bTDC at $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, full throttle opening and $\alpha = 1.0$. Increasing the compression ratio or combining the use of the Miller cycle for turbocharged engines helps improve engine performance such as power, torque and efficiency; reduction of specific fuel consumption.

Keywords: spark ignition internal combustion engine (SI engine), ammonia, knock probability determination, compression ratio, turbocharged, Miller cycle.

For citation: Nguyen V.D., Dunin A.Yu., Akhmetzhanova E.U., Petrov A.M., Filippova E.M. Assessment of the performances of a spark ignition engine when operating on ammonia. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024. No. 4 (42).

Введение

Двигатель с искровым зажиганием (ДсИЗ) продолжает оставаться одной из основных энергетических установок на легковом автомобильном транспорте, к которой предъявляется целый комплекс требований, связанных с мощностными, экономическими показателями и токсичностью отработавших газов (ОГ) [1].

Ресурсы ископаемого топлива ограничены и постепенно истощаются из-за чрезмерного использования человеком. Использование ископаемого топлива для ДсИЗ наносит большой вред окружающей среде из-за загрязнения, вызванного продуктами сгорания [2-3].

В этой связи одним из важных направлений развития ДсИЗ признается применение топлив, альтернативных ископаемым топливам. Применение альтернативных топлив не только расширяет сырьевую базу, но и снижает вредное влияние на окружающую среду. Среди различных видов топлива аммиак (NH_3) является одним из наиболее перспективных вследствие его низкой стоимости, практически неограниченной сырьевой базой и доступности использования. При полном сгорании NH_3 образуется только одна группа вредных компонентов – оксиды азота (NO_x). Температуры горения аммиачно-воздушных смесей ниже, чем у бензо-воздушных, что

обеспечивает снижение NO_x [10]. Помимо организации сгорания аммиака в цилиндре ДсИЗ, из него возможно получить водород для дальнейшего использования в качестве топлива. В таблице 1 показаны основные свойства аммиака и его сравнение со свойствами бензина и водорода.

NH₃ имеет низшую теплоту сгорания и ламинарную скорость горения на 57,8 и 97 % меньше, соответственно, чем бензин. Кроме того, у аммиака высокие температура самовоспламенения и высокое октановое число (ОЧ = 130), поэтому детонационная стойкость NH₃ лучше, чем у бензина. Это делает его пригодным для применения в ДсИЗ с высокой степенью сжатия или с высоким давлением наддува для повышения эффективности двигателя.

Таблица 1

Свойства аммиака по сравнению со свойствами водорода и бензина [6...9]

Свойства	Бензин	Аммиак	Водород
Хранение	при жидком состоянии [300 К, 0,1 МПа]	при жидком состоянии [300 К, 1,1 МПа]	при жидком состоянии [300 К, 0,7 МПа]
Низшая теплота сгорания Н _ц , МДж/кг	44,5	18,8	120
Отношение Н _ц /l ₀ , МДж/кг	2,99	3,05	3,45
Плотность при 0,1 МПа и 298 К, кг/м ³	736	0,73	0,08
Скрытая теплота испарения, кДж/кг	348,7	1370	455
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	—	—

Объект исследования и его математическое описание

В качестве объекта исследования был выбран двигатель с искровым зажиганием 4Ч 7,6/7. Основные его параметры представлены в таблице 2.

Таблица 2

Основные параметры исследуемого двигателя

Параметр	Значение
Тип двигателя и его модель	ДсИЗ 4Ч 7,6/7
Рабочий объем двигателя, см ³	1289
Диаметр цилиндра, мм	76
Ход поршня, мм	71
Степень сжатия	9,9
Номинальная мощность, кВт	60
Номинальная частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	5000
Максимальный крутящий момент, Н·м	100
Частота вращения коленчатого вала, соответствующая максимальному крутящему моменту, мин ⁻¹	2000

Для проведения сравнения показателей работы ДсИЗ при его питании бензином и аммиаком проведены расчетные исследования с применением расчетного элемента «ДсИЗ-МАДИ» программного комплекса ПК «ДВС-МАДИ». «ДсИЗ-МАДИ» разработан на основе математической модели, предложенной в МАДИ. Описание математической модели и верификация ДсИЗ были представлены в статье [4].

Поскольку в процессе расчетных исследований планировалось рассмотреть влияние на показатели ДсИЗ степени сжатия и наддува, то важная задача при математическом моделировании модели ДсИЗ – распознавание детонационного сгорания топлива. Детонационное сгорание является основной причиной нарушения долговечности деталей цилиндрико-поршневой группы двигателя. Участок индикаторной диаграммы, показывающий наличие значительной детонации двигателя ВАЗ 21124 (4Ч 7,6/7) при проведении эксперимента на бензине представлен на рис. 1. Данный рисунок – один из результатов проведенных исследований, необходимых для верификации модели детонации, заложенной в ПК «ДВС-МАДИ».

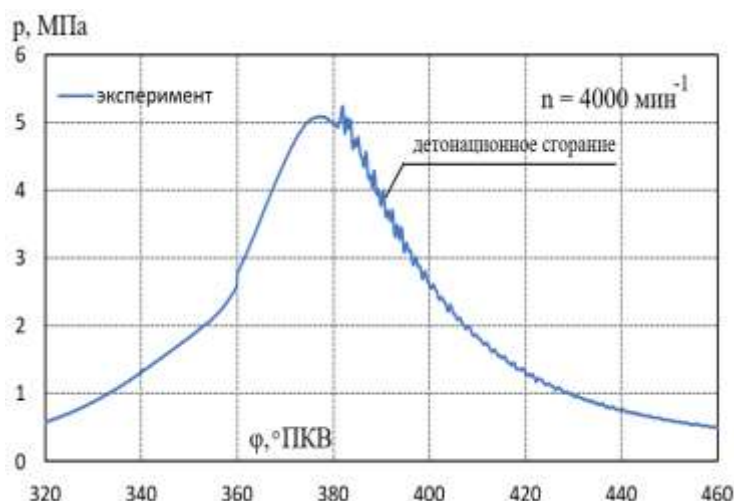


Рис. 1. Участок индикаторной диаграммы со значительной детонацией в цилиндре двигателя ВАЗ 21124 (4Ч 7,6/7), октановое число топлива ОЧ = 92 ($n = 4000 \text{ мин}^{-1}$; $\alpha = 1$; $\varphi_{0.3} = 20^\circ \text{ ПКВ до ВМТ}$)

На рисунке 1: p – давление над поршнем в цилиндре двигателя; n – частота вращения коленчатого вала двигателя; α – коэффициент избытка воздуха; $\varphi_{0.3}$ – угол опережения зажигания, выраженный в градусах поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки ($^\circ \text{ ПКВ до ВМТ}$).

Определение детонации ведется по показателю y , расчет которого осуществляется по формуле Дауда и Ейза [5], представляющей из себя интеграл Ливенгуда:

$$y = \frac{1}{19,75} \cdot \left(\frac{ON}{100} \right)^{-3,4107} \cdot \int_0^{\tau} (10,2 \cdot p)^{1,7} \cdot e^{-3800/T} \cdot d\tau, [-], \quad (1)$$

где ON – октановое число топлива; τ – текущее время с момента начала сжатия, с; p – текущее давление в цилиндре двигателя, МПа; T – текущая температура в цилиндре, К; e – основание натуральных логарифмов.

Величина y за промежуток времени от начала сжатия до момента, когда температура T будет 600 К, меньше 0,01, а при 700 К – y не превысит 0,05. Поэтому расчет y целесообразно вести не с начала сжатия, а с момента, в процессе сжатия, когда температура в цилиндре станет порядка 600К.

Критическое условие $y \geq 1$ имеет смысл лишь до момента сгорания всего топлива: $X = 1$. Таким образом, условие возникновения детонации примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} y = \frac{1}{19,75} \cdot \left(\frac{ON}{100} \right)^{-3,4107} \cdot \int_{\tau_{600}}^{\tau} (10,2 \cdot p)^{1,7} \cdot e^{-3800/T} \cdot d\tau \geq 1 \\ 0 \leq X \leq 1 \end{array} \right. , \quad (2)$$

где τ_{600} – времени, прошедшее с начала сжатия до момента, когда значение T достигло 600 К, [с].

В программе интегрирование согласно формуле (2) выполнялось численным методом с шагом $\Delta\tau$:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta S}{C_{\Pi}}, \text{ с}, \quad (3)$$

где ΔS – перемещение поршня за один шаг расчета программы, м; C_{Π} – средняя скорость поршня, м/с.

Результаты расчетного исследования применения аммиака в качестве топлива для двигателя с искровым зажиганием

На первом этапе расчетного исследования были определены внешние скоростные характеристики (ВСХ) ДсИЗ 4Ч 7,6/7 при его работе на бензине и NH_3 . Для обоих вариантов энергоносителей рассматривалось внешнее смесеобразование при подготовке топливо-воздушной смеси. Полученные ВСХ приведены на рис. 2, где M_k – эффективный крутящий момент, N_e – эффективная мощность; g_e – удельный эффективный расход топлива; dx – доля детонирующего топлива (оценивает вероятность возникновения детонации); T_z – максимальная температура сгорания; NO_x – выброс NO_x .

Применение NH_3 с высоким октановым числом позволило обеспечить работу ДсИЗ на более ранних углах опережения зажигания без опасности возникновения детонации. Это предопределило бóльшую эффективность

использования теплоты, подведенной в цикл со сгоранием, и, как результата, рост мощностных показателей. Установлено, что при переходе с бензина на аммиак максимальное значение M_k увеличилось на 15,8%, а N_e – 11,3%.

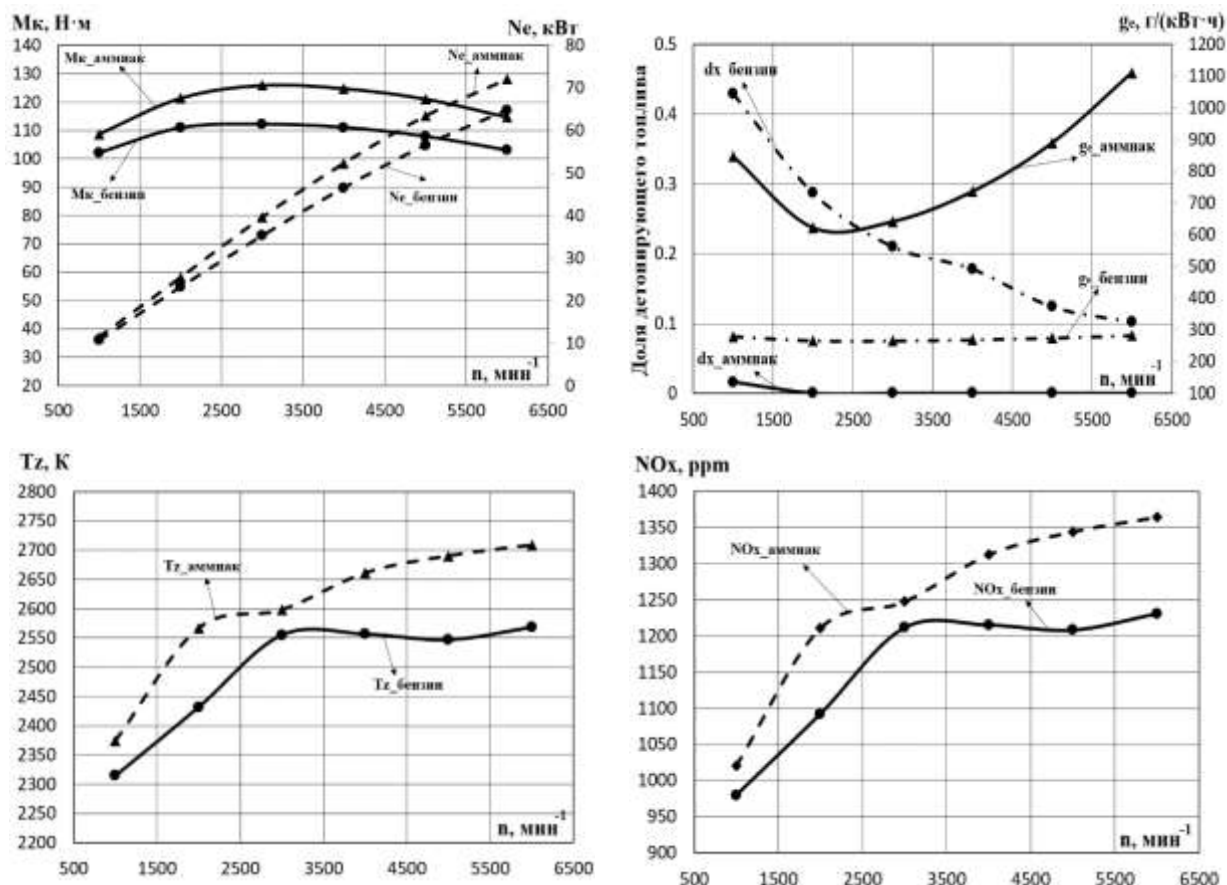


Рис. 2. BCX ДсИЗ 4C 7,6/7 при его работе на бензине и аммиаке

Удельный расход аммиака почти в 2,5 раза выше, чем у бензина. Это обусловлено меньшей объемной плотностью энергии и меньшей теплотворной способности аммиачно-воздушной смеси по сравнению с бензином. Увеличение суммарного количества NO_x в ОГ при сжигании аммиака по сравнению с бензином связано с более высокой максимальной температурой цикла. Доля детонирующего топлива бензина существенно выше, чем у аммиака.

Однако переход на аммиак уменьшил вероятность возникновения детонации на средних и малых частотах вращения коленчатого вала. Этот

факт позволяет рекомендовать увеличение степени сжатия ДсИЗ при работе на NH_3 , что положительно скажется на снижении расхода аммиака.

На рисунке 3 показана регулировочная характеристика ДсИЗ по составу смеси, полученная на режиме работы двигателя, соответствующего максимальному крутящему моменту: $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ при полностью открытой дроссельной заслонке ($\varphi_{\text{дз}} = 100 \%$).

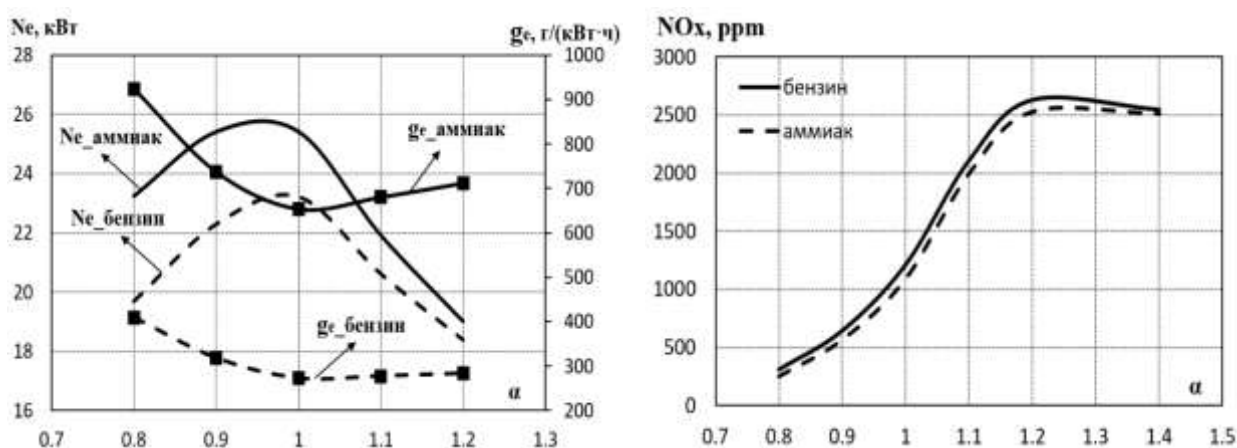


Рис. 3. Регулировочная характеристика по составу смеси ДсИЗ 4Ч 7,6/7 ($n = 2500 \text{ мин}^{-1}$, $\varphi_{\text{дз}} = 100 \%$)

Мощностной состав смеси при работе на аммиаке составил $\alpha_m = 0,95$, а на бензине — $\alpha_m = 0,98$. Минимальный удельный эффективный расход топлива был достигнут при $\alpha_{\text{эк}} = 1,0$ на NH_3 и $\alpha_{\text{эк}} = 1,04$ — на бензине. Таким образом, диапазон рабочих составов смеси в случае аммиака уже по сравнению с бензином. Количество NO_x увеличивается с ростом α и начинает уменьшаться после достижения максимума при $\alpha \approx 1,2$ как для аммиака, так и для бензина.

Перевод ДсИЗ на подачу NH_3 сопровождается применением более ранних углов опережения зажигания (рис. 4).

Так для ДсИЗ 4Ч 7,6/7 при полностью открытой дроссельной заслонке ($\varphi_{\text{дз}} = 100 \%$) на режиме работы $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и $\alpha = 1,0$ оптимальный угол опережения зажигания на аммиаке равен $\varphi_{0,3} = 60^\circ$ ПКВ до ВМТ, а на бензине — 25° ПКВ до ВМТ.

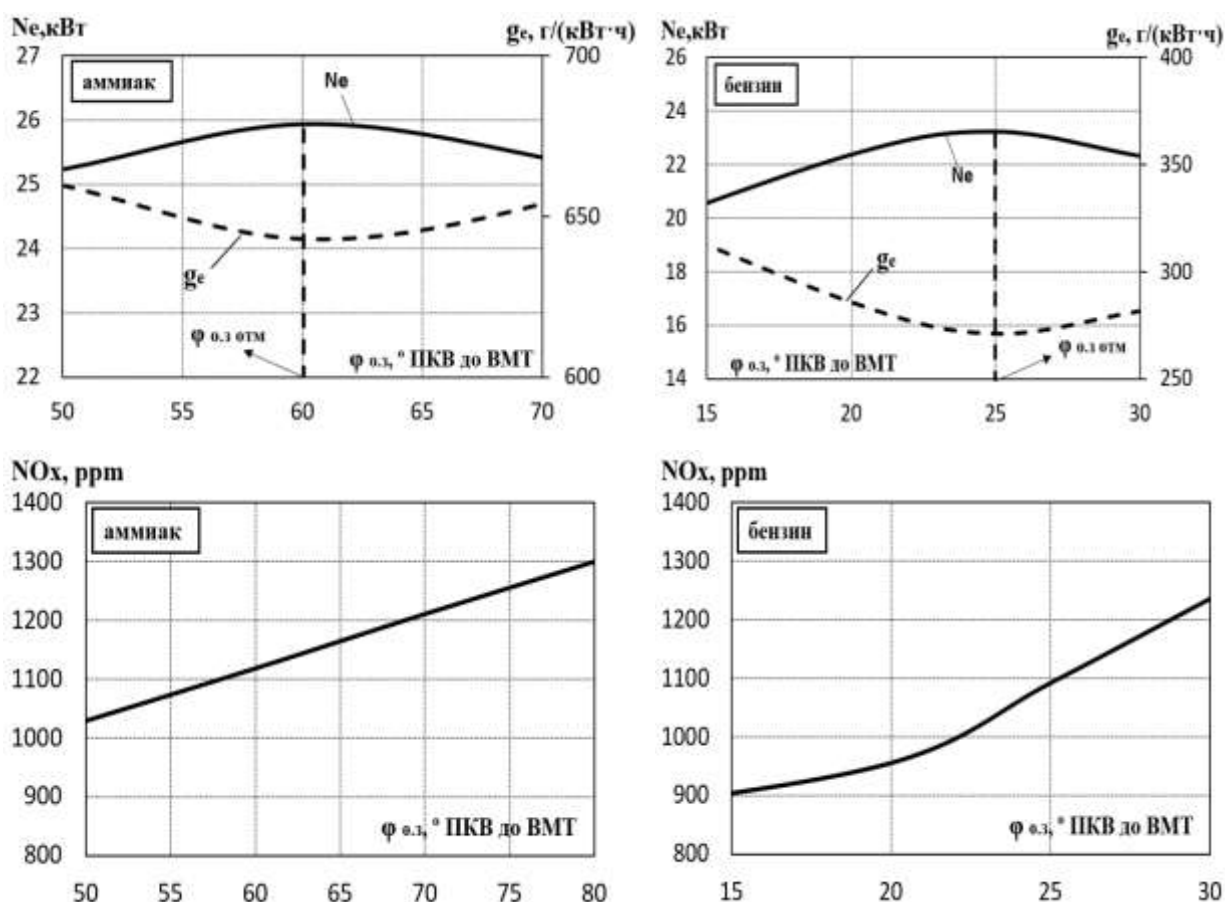


Рис. 4. Регулировочная характеристика по УОЗ при постоянном положении ДЗ ДсИЗ 4Ч 7,6/7 ($\phi_{дз} = 100\%$; $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$; $\alpha = 1$)

Отличие в $\phi_{0.3}$ между бензином и аммиаком объясняется более высокой температурой самовоспламенения последнего и более низкую ламинарной скоростью его горения. С увеличением УОЗ вероятность детонационного сгорания и количество NO_x будут увеличиваться. При этом количество NO_x в аммиачном двигателе выше, чем в бензиновом.

При $\phi_{0.3} = 60^\circ$ ПКВ до ВМТ максимальное давление в цилиндре составило $p_z = 7,3 \text{ МПа}$ (рис. 5), что соответствует уровню, достигаемому в 4Ч 7,6/7, питаемому бензином. Максимальная эффективная мощность в случае аммиака достигла 25,9 против 23,4 кВт на бензине, а минимальный удельный эффективный расход топлива – 643,2 и 270,6 г/(кВт·ч) соответственно (рис. 4).

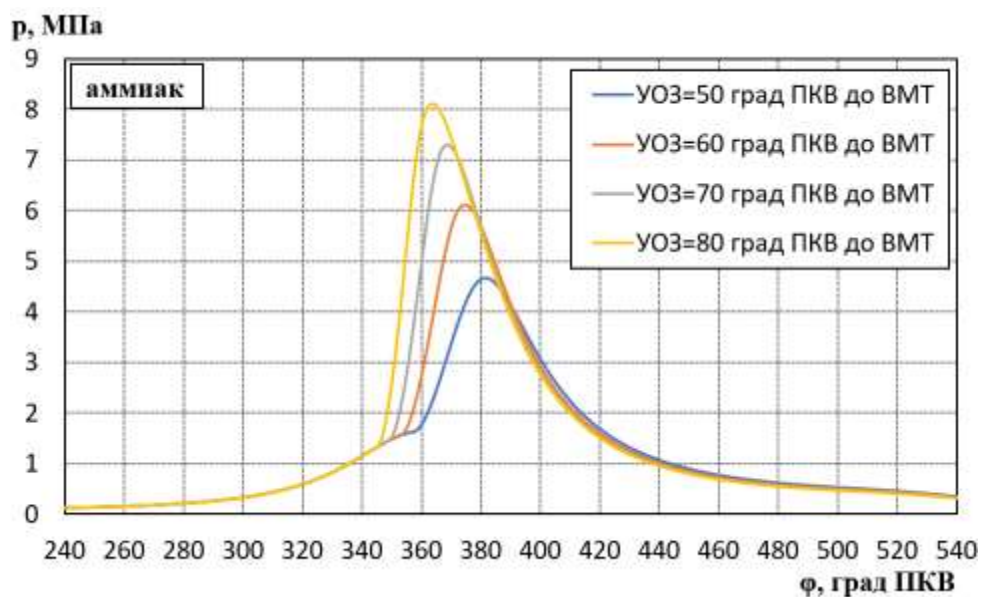


Рис. 5. Индикаторные диаграммы, рассчитанные при разных углах опережения зажигания и постоянном положении дроссельной заслонки ДсИЗ 4Ч 7,6/7, работающего на аммиаке ($\eta_v = 0,9$; $\phi_{dz} = 100\%$; $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$; $\alpha = 1,0$)

Высокие антидетонационные свойства NH_3 способствуют повышению экономических и мощностных показателей ДсИЗ за счет увеличения степени сжатия. Так, при работе ДсИЗ на внешней скоростной характеристике с повышением степени сжатия от 9,9 до 14 (рис. 6) максимально увеличились: N_e на 8,8 %; индикаторный КПД η_i на 6,8 %. Удельный эффективный расход g_e максимально снизился на 7,2 %.

При повышении степени сжатия с 9,9 до 14 максимальная температура сгорания аммиачно-воздушной смеси уменьшается. Количество NO_x в ОГ падает: максимальное снижение составило 5,4%. Однако, повышение степени сжатия двигателя приводит к возрастанию конечной температуры при сжатии. При этом увеличивается доля детонирующего топлива.

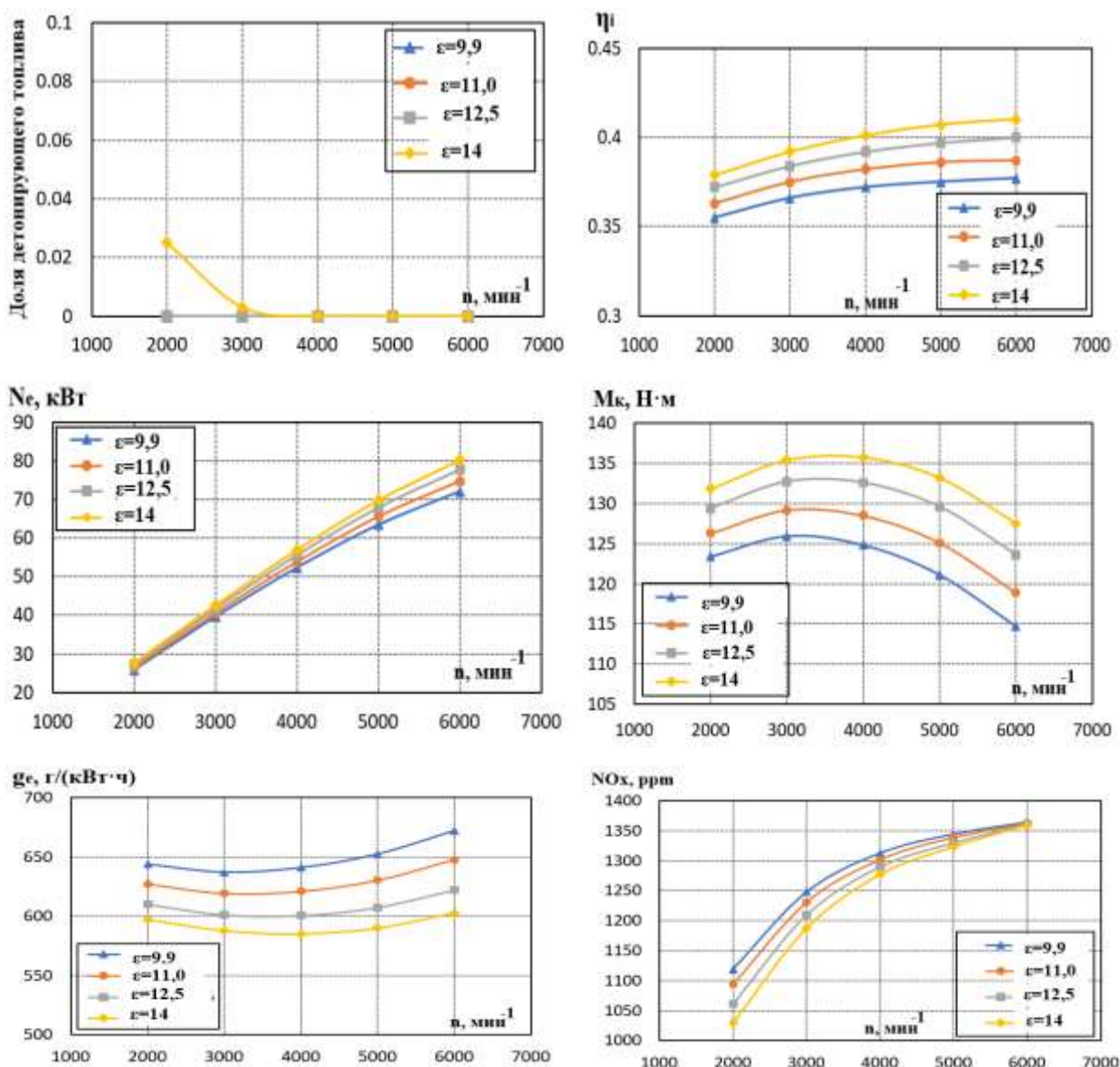


Рис. 6. Внешние скоростные характеристики ДсИЗ 4Ч 7,6/7 при его работе на аммиаке с различными степенями сжатия

Показанная на рисунке 6 доля детонирующего топлива, возникающего в диапазоне частот вращения коленчатого вала от 2000 до 3000 min^{-1} не превышает аналогичную величину для ДсИЗ, работающего на бензине (рис. 4).

Возможность дальнейшего улучшения экономичности ДсИЗ при работе на аммиаке и повышения его мощностных показателей связана с совместным применением цикла Миллера и наддува. Применение циклов с продолженным расширением (цикл Миллера) приводит к снижению

температуры смеси в конце такта сжатия, а с ней и к уменьшению вероятности возникновения детонации.

На рисунке 7 представлены результаты расчетного исследования зависимости показателей двигателей ДсИЗ без наддува (4Ч 7,6/7) и с наддувом (4ЧН 7,6/7), работающих на аммиаке и бензине ($\varepsilon = 9,9 \dots$, $\alpha = 1$, $\varphi_{\text{дз}} = 100 \%$; $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$), от давления наддува p_k и момента закрытия впускного клапана $\varphi_{\text{зак. вп.}}$ до прихода поршня в нижнюю мертвую точку (НМТ). При этом для каждой совокупности значений p_k и $\varphi_{\text{зак. вп.}}$ добивались возможного равенства N_e .

Сопоставление мощностных и экономических показателей двигателей 4Ч 7,6/7 и 4ЧН 7,6/7 проводилось по результатам их работы на аммиаке и на бензине при изменении $\varphi_{\text{зак. вп.}}$ от 20° ПКВ до НМТ.

Работа ДсИЗ на бензине с высоким давлением наддува ($p_k = 0,3 \text{ МПа}$) и малой вероятностью возникновения детонации (меньше $0,2$) возможна, начиная с $\varphi_{\text{зак. вп.}} = 100^\circ$ ПКВ до НМТ и более, в то время как при NH_3 – с 20° ПКВ до НМТ. Величина N_e ДсИЗ с $p_k = 0,3 \text{ МПа}$, работающего на аммиаке при $\varphi_{\text{зак. вп.}} = 20^\circ$ ПКВ до НМТ составляет 82 кВт , тогда как на бензине при $\varphi_{\text{зак. вп.}} = 100^\circ$ ПКВ до НМТ – 32 кВт .

При работе на NH_3 с $\varphi_{\text{зак. вп.}} = 100^\circ$ ПКВ до НМТ и $p_k = 0,3 \text{ МПа}$ значение эффективной мощности ($N_e = 33 \text{ кВт}$) практически соответствует мощности безнаддувного варианта ДсИЗ, работающего на бензине с $\varphi_{\text{зак. вп.}} = 20^\circ$ ПКВ до НМТ. Однако, в случае надувного варианта двигателя, значительно меньше g_e : 500 против $640 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. В обоих вариантах отмечается низкая вероятность возникновения детонации. Повышение $\varphi_{\text{зак. вп.}}$ способствует снижению как максимальной температуры сгорания топливо-воздушной смеси, так и количества NO_x в ОГ.

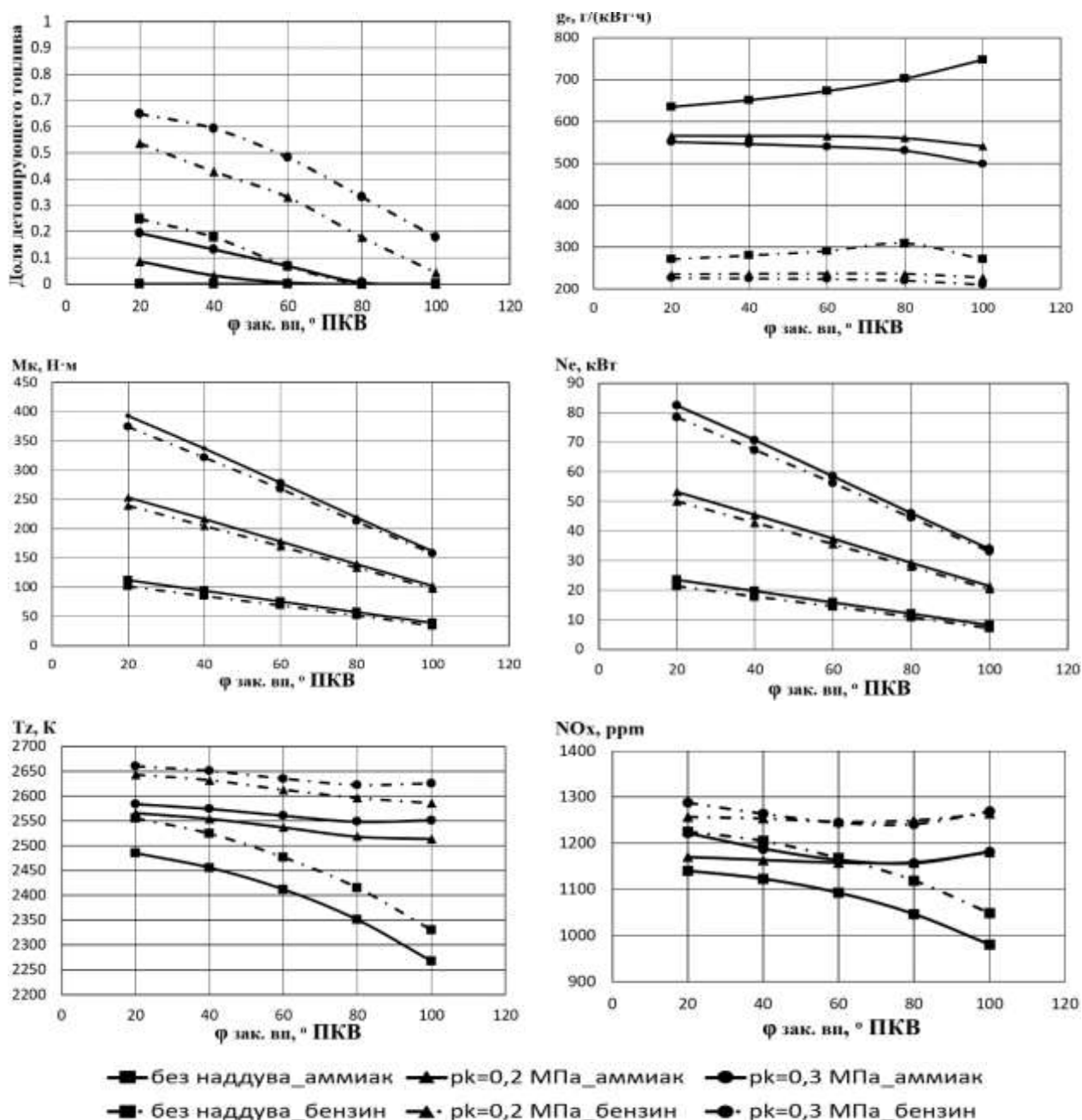


Рис. 7. Зависимость показателей ДсИЗ от угла закрытия впускного клапана до НМТ (применения цикла Миллера) и давления наддува

Выводы

Аммиак – перспективное топливо, применение которого потенциально может обеспечить качественное улучшение показателей двигателей с искровым зажиганием (ДсИЗ):

- отсутствие углерода в составе аммиака практически полностью (за исключением расхода масла на угар) снимают проблему выброса оксида (CO) и диоксида (CO₂) углерода и углеводородов (CH);
- высокое октановое число аммиака (ОЧ = 130) способствует значимому увеличению степени сжатия (более 13,5) или давления наддува (более 0,2 МПа) в ДсИЗ, что, в свою очередь, повышает его индикаторный КПД;
- дальнейшим направлением развития ДсИЗ, работающих на аммиаке, является совместное применение цикла Миллера с очень ранним закрытием впускного клапана (80 ... 100 ° ПКВ до НМТ) и высокого наддува ($p_k = 0,2 \dots 0,3$ МПа).

Список источников

1. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / А. А. Александров, И. А. Архаров, В. В. Багров, А. И. Гайворонский, Л. В. Грехов, С. Н. Девянин, Н. А. Иващенко, В. А. Марков, 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. Моделирование рабочего процесса двигателя с искровым зажиганием, питаемого безуглеродным топливом / В. З. Нгуен, А. Ю. Дунин, Э. У. Ахметжанова, А. М. Петров, Д.С. Конюшков // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2023. – № 4(38). – EDN XMIVQD.

5. Dauaud, A. M. Four – Octane – Number Method for Predicting the Anti-Knock Behavior of fuels and Engines / A. M. Dauaud, P. Eyzat // SAE Transactions. – 1978. – P. 294-308. – DOI 10.4271/780080.
6. Ammonia for power / A. Valera-Medina, H. Xiao, P. J. Bowen [et al.] // Progress in Energy and Combustion Science. – 2018. – Vol. 69. – P. 63-102. – DOI 10.1016/j.pecs.2018.07.001. – EDN VJIYIV.
7. Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: Engine performance and analysis of a proposed fuel system / C. S. Mørch, A. Bjerre, M. P. Gøttrup [et al.] // Fuel. – 2011. – Vol. 90, No. 2. – P. 854-864. – DOI 10.1016/j.fuel.2010.09.042. – EDN OBEAYB.
8. The role of hydrogen for future internal combustion engines / A. Onorati, R. Payri, Bm. Vaglieco [et al.] // International Journal of Engine Research. – 2022. – Vol. 23, No. 4. – P. 529-540. – DOI 10.1177/14680874221081947. – EDN JRPOGW.
9. Ammonia as Fuel for Transportation to Mitigate Zero Carbon Impact / C. Mounaïm-Rousselle, P. Brequigny, A. Valera-Medina, E. Boulet, D. Emberson, T. Løvås // Engines and Fuels for Future Transport, Energy, Environment, and Sustainability. – Singapore : Springer, 2021. – P. 257–279. – DOI 10.1007/978-981-16-8717-4_11.
10. Combustion stability limits and NOx emissions of non-premixed ammonia-substituted hydrogen-air flames / D. H. Um, J. M. Joo, S. Lee, O. C. Kwon // International Journal of Hydrogen Energy. – 2013. – Vol. 38, No. 34. – P. 14854-14865. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2013.08.140.

References

1. Aleksandrov A. A., Arkharov Y. A., Bagrov V. V., Gaivoronsky A. I., Grekhov L. V., Devyanin S. N., Ivashchenko N. A., Markov V. A. *Alternativnye topliva dlya dvigatelej vnutrennego sgoraniya* (Alternative fuels for internal combustion engines), Moscow, OOO NIC «InzheneR», OOO «Oniko-M», 2012, 790 p., ISBN 978-5-7013-0140-3.
2. Markov V. A., Devyanin C. N., Semenov C. N., Shakhov A. V., Bagrov V. V. *Ispol'zovanie 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., ISBN 978-5-7013-0120-5.
3. Markov V. A., Bebenin E. V., Podnyakov E. F. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2013, no. 5(35), pp. 24-29.
4. Dung N. V., Dunin A. Yu., Akhmetzhanova E. U., Petrov A. M., Konyushkov D. S. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2023, no 4(38).
5. Dauaud A.M., Eyzat P. Four – Octane – Number Method for Predicting the Anti-Knock Behavior of fuels and Engines, *SAE Transactions*, 1978, pp. 294-308, doi 10.4271/780080.
6. Valera-Medina A., Xiao H., Bowen P.J., Owen-Jones M., David W.I.F. Ammonia for power, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, vol. 69, pp. 63-102, doi 10.1016/j.pecs.2018.07.001.

7. Mørch C.S., Bjerre A., Gøttrup M.P., Sørensen S.C., Schramm J. 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 10.1016/j.fuel.2010.09.042.
8. Onorati A., Payri R., Vaglieco Bm., Agarwal Ak., Bae C., Bruneaux G., Canakci M., Gavaises M., Günthner M., Hasse C., Kokjohn S., Kong S.C., Moriyoshi Y., Novella R., Pesyridis A., Reitz R., Ryan T., Wagner R., Zhao H. The role of hydrogen for future internal combustion engines, *International Journal of Engine Research*, 2022, vol. 23, no. 4, pp. 529–540, doi 10.1177/14680874221081947.
9. Mounaim R. C., Brequigny P., Medina A.V., Boulet E., Emberson D., Lovas T. Ammonia as Fuel for Transportation to Mitigate Zero Carbon Impact, *Engines and Fuels for Future Transport, Energy, Environment, and Sustainability*, Singapore, Springer, 2021, pp. 257–279, doi 10.1007/978-981-16-8717-4_11.
10. Um D. H., Joo J. M., Lee S., Kwon O. C. Combustion stability limits and NOx emissions of non-premixed ammonia-substituted hydrogen-air flames, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, vol. 38, no. 34, pp. 14854–14865, doi 10.1016/j.ijhydene.2013.08.140.

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

Информация об авторах

Нгуен Ван Зунг, аспирант, МАДИ.

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

Ахметжанова Эльмира Умяровна, аспирант, МАДИ.

Петров Андрей Михайлович, аспирант, МАДИ.

Филиппова Евгения Максимовна, магистрант, МАДИ.

Information about the authors

Nguyen Van Dung, postgraduate, MADI.

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

Akhmetzhanova Elmira U., postgraduate, MADI.

Petrov Andrey M., postgraduate, MADI.

Filippova Eugenia M., undergraduate student, MADI.

Статья поступила в редакцию 14.11.2024; одобрена после рецензирования 18.11.2024; принята к публикации 20.12.2024.

The article was submitted 14.11.2023; approved after reviewing 18.11.2024; accepted for publication 20.12.2024.