



Оценка топливной экономичности поршневых двигателей после их перевода на газомоторное топливо

Введение

Известно, что одним из актуальных направлений развития поршневого двигателя является использование в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) газомоторного топлива (пропана и/или метана) [1-3]. Это связано с рядом положительных эффектов, в частности, с существенным улучшением топливной экономичности и экологичности ДВС. При этом развитие данного направления связано, как с разработкой оригинальных конструкций газопоршневых ДВС (топливной аппаратуры, газобаллонного оборудования, способов смесеобразования и т.д.), так и переводом существующих бензиновых или дизельных двигателей на газообразное топливо (без существенного изменения конструкции). Очевидно, что рабочие процессы газопоршневых двигателей имеют свои особенности, отличные от бензиновых ДВС и дизелей. Соответственно, перевод любых поршневых двигателей на газомоторное топливо требует научной проработки, доводки рабочего процесса и предварительной оценки технико-экономических параметров.

По данному направлению можно выделить ряд разнонаправленных публика-

ций. Например, в статьях [4, 5] авторы предлагают оригинальные математические модели, описывающие особенности рабочего цикла поршневых ДВС, работающих на газомоторном топливе. В работах [6, 7] на основе численного моделирования производится оценка влияния степени сжатия на технико-экономические показатели автомобильных двигателей «Волга» и «ИЖ», работающих на газе.

Перевод любых поршневых двигателей на газомоторное топливо требует научной проработки, доводки рабочего процесса и предварительной оценки технико-экономических параметров

Статья [8] посвящена доводке рабочего процесса бензинового двигателя после его перевода на газообразное топливо. Также можно отметить более узконаправленные исследования газопоршневых ДВС. Так, исследователи уделяют внимание закономерностям сгорания различных видов газа в камере сгорания двигателей [9, 10], оценке влияния закрутки рабочего тела на

Рецензия эксперта на статью получена 10.02.2019 [Expert review on the article received February 10, 2019].

УДК 621.433.2. Научная специальность: 05.04.02.

Оценка топливной экономичности поршневых двигателей после их перевода на газомоторное топливо

Леонид В. Плотников, к.т.н., доцент, кафедры «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); **Андрей М. Козубский**, к.т.н., главный конструктор по гидравлическим экскаваторам ПАО «Уралмашзавод», инженер кафедры «Подъемно-транспортные машины и роботы» УрФУ; **Александр Г. Максименко**, директор ООО «Элитгаз»; **Леонид Е. Осипов**, студент магистратуры, кафедры «Турбины и двигатели», УрФУ

Данная статья посвящена оценке энергоэффективности поршневых двигателей, переведённых на газомоторное топливо. На основе численного моделирования рабочих циклов двигателей, работающих на разных видах топлива (бензин, пропан, метан), производится анализ их технико-экономических показателей. Установлено, что перевод бензинового двигателя на пропан приводит к снижению мощности двигателя на 5% при уменьшении удельного расхода топлива на 4%; а применение в качестве топлива метана вызывает падение мощности на 12% при снижении расхода топлива на 13%.

Ключевые слова: поршневой двигатель, газомоторное топливо, численное моделирование, топливная экономичность, рабочие процессы.

UDC 621.433.2. Number of scientific specialty: 05.04.02.

Evaluation of the fuel efficiency of piston engines after their transfer to gaseous fuel

Leonid V. Plotnikov, PhD, Associate Professor, Department of the Turbines and Engines, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU); **Andrey M. Kozubsky**, PhD, Chief Designer for hydraulic excavators of "Uralmashplant", JSC, Engineer of the "Lifting and transporting machines and robots" Department, UrFU; **Alexander G. Maksimenko**, Director of "Elitegas", LLC; **Leonid E. Osipov**, graduate student, Department of the Turbines and Engines, UrFU

This article is devoted to assessing the energy efficiency of piston engines converted to gas engine fuel. On the basis of numerical simulation of the operating cycles of engines operating on different types of fuel (gasoline, propane, methane), their technical and economic indicators are analyzed. It has been established that converting a gasoline engine to propane results in a 5% reduction in engine power while a 4% reduction in specific fuel consumption; and the use of methane as a fuel causes a 12% drop in power, with a 13% reduction in fuel consumption.

Key words: piston engine, gas engine fuel, numerical simulation, fuel efficiency, work processes.

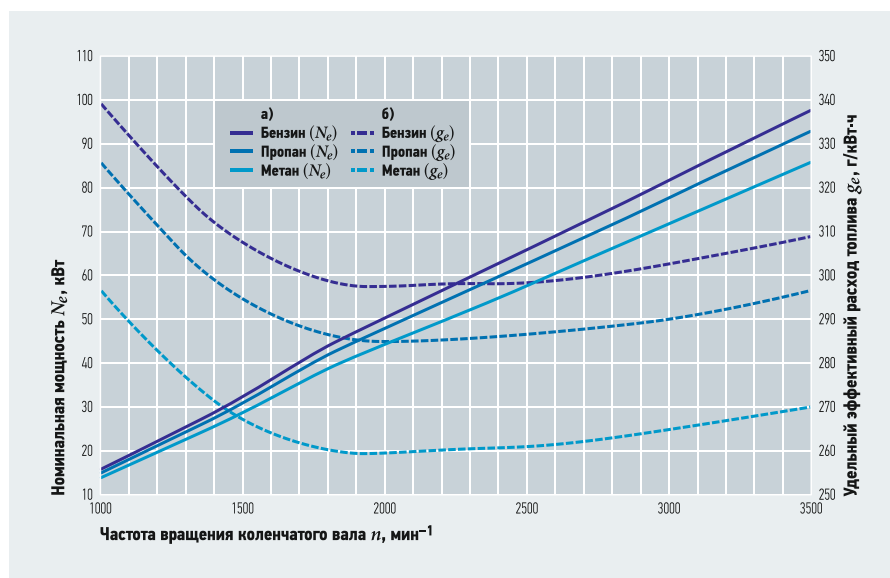


Рис. 1. Зависимости эффективной мощности (а) и удельного эффективного расхода топлива (б) от частоты вращения коленчатого вала поршневого двигателя, работающего на разных видах топлива

впуске на экологические и технико-экономические показатели газопоршневого ДВС [11], а также анализу функционирования многотопливного газового двигателя [12]. Таким образом, на сегодняшний день учёные и специалисты нацелены на разработку мер по повышению эффективности газопоршневых двигателей. Однако при этом имеется довольно мало исследований, в которых бы производился анализ тех или иных научных и инновационных решений на технико-экономические и экологические параметры конкретных поршневых ДВС и целесообразность их внедрения на практике.

В данной статье на основе численного моделирования рабочего цикла произведена оценка топливной экономичности бензинового ДВС (8Ч9,2/8,8) после его перевода на газомоторное топливо (пропан и метан), а также выполнен анализ влияния степени сжатия на основные показатели рассматриваемого двигателя, работающего на разных топливах.

Постановка задачи

В качестве базового двигателя для исследования был выбран широко распространённый бензиновый двигатель 8Ч9,2/8,8 (заводское обозначение ЗМЗ-5231.10. Это V-образный (под углом 90°), четырёхтактный, карбюраторный, верхнеклапанный, восьмичилиндровый двигатель без наддува со следующими основными параметрами:

- рабочий объём цилиндров $V_h = 4,67$ л;
- степень сжатия $\epsilon = 7,6$;
- коэффициент избытка воздуха $a = 1$;
- номинальная мощность $N_e = 91,2$ кВт при 3200–3400 мин^{−1};
- максимальный крутящий момент $M_e = 298$ Н·м при 1600–2000 мин^{−1};
- количество клапанов на цилиндр — 2;
- высота подъёма клапанов $h = 10$ мм.

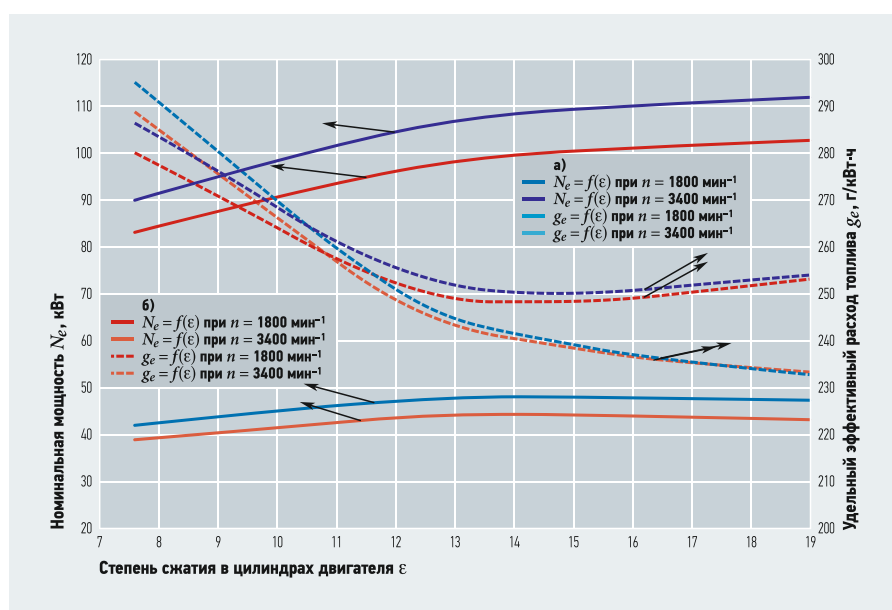


Рис. 2. Зависимости эффективной мощности и удельного эффективного расхода топлива от степени сжатия поршневого двигателя, работающего на пропане (а) и метане (б)

Таким образом, на сегодняшний день учёные и специалисты нацелены на разработку мер по повышению эффективности газопоршневых двигателей. Однако при этом имеется довольно мало исследований, в которых бы производился анализ тех или иных научных и инновационных решений на технико-экономические и экологические параметры конкретных поршневых ДВС и целесообразность их внедрения на практике. В данной статье на основе численного моделирования рабочего цикла произведена оценка топливной экономичности бензинового ДВС (8Ч9,2/8,8) после его перевода на газомоторное топливо

Исследования проводились на основе численного моделирования рабочего цикла двигателя в программном комплексе «Дизель-РК», разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Сначала была проведена настройка математической модели базового двигателя по 39 параметрам, включающим фазы газораспределения, геометрию впускных и выпускных систем, продолжительность сгорания, угол опережения зажигания, конструктивные особенности цилиндропоршневой группы и т.д. В результате были сопоставлены внешние скоростные характеристики (по мощности, крутящему моменту и расходу топлива) двигателя-прототипа (данные из руководства по эксплуатации) и базового двигателя (дан-

ные «Дизель-РК»), отличия в которых не превышали 7 %.

Далее в математической модели осуществлялась замена жидкого топлива (бензина) на газообразное — пропан и метан. Химический состав (в процентных долях) бензина был следующим: $C = 0,855$, $H = 0,145$ при низшей теплоте сгорания H_u , равной 44 МДж/кг. Химический состав пропана: $C = 0,817$, $H = 0,182$ при $H_u = 46,47$ МДж/кг; метан: $CH_4 = 0,95$, $C_2H_6 = 0,05$ при $H_u = 49,74$ МДж/кг.

Исследования проводились в диапазоне частот коленчатого вала n от 1000 до 3400 мин^{−1} с шагом 400 мин^{−1} при стандартных атмосферных условиях. Ключевыми параметрами, на основании которых производился анализ влияния перевода ДВС на газообразное топливо, являлись эффективная мощность N_e и удельный эффективный расход топлива g_e .

Результаты моделирования рабочего цикла поршневых ДВС

На рис. 1 показаны зависимости N_e и g_e от частоты вращения коленчатого вала n после перевода базового двигателя на газомоторное топливо (пропан и метан) с сохранением всех основных параметров ДВС (степени сжатия, фаз газораспределения, угла опережения зажигания и т.д.).

Как и следовало ожидать, перевод бензинового двигателя на газ сопровождается уменьшением мощности во всём диапазоне частот вращения коленвала: в случае работы ДВС на пропане снижение N_e не превышает 5 %, а при использовании метана достигает 12 %. При этом наблюдается улучшение топливной экономичности газопоршневых двигателей вну-

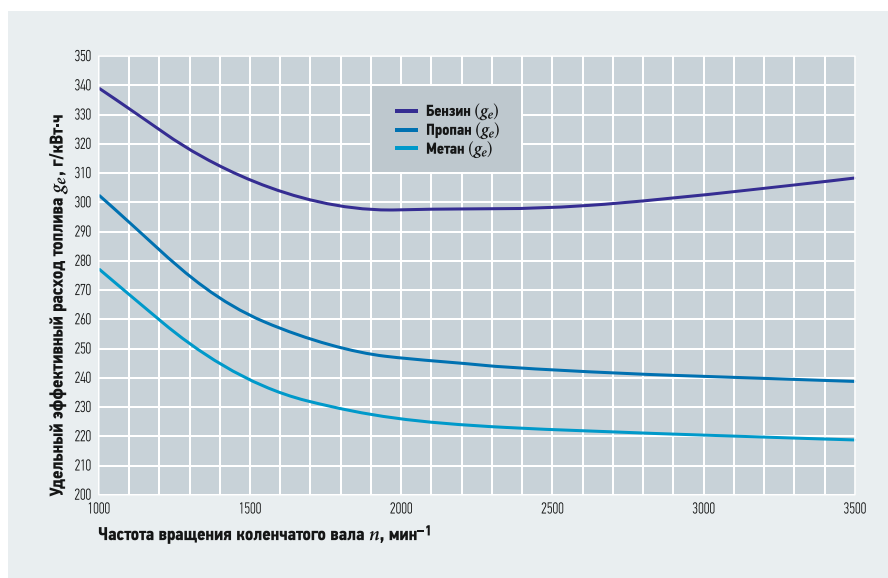
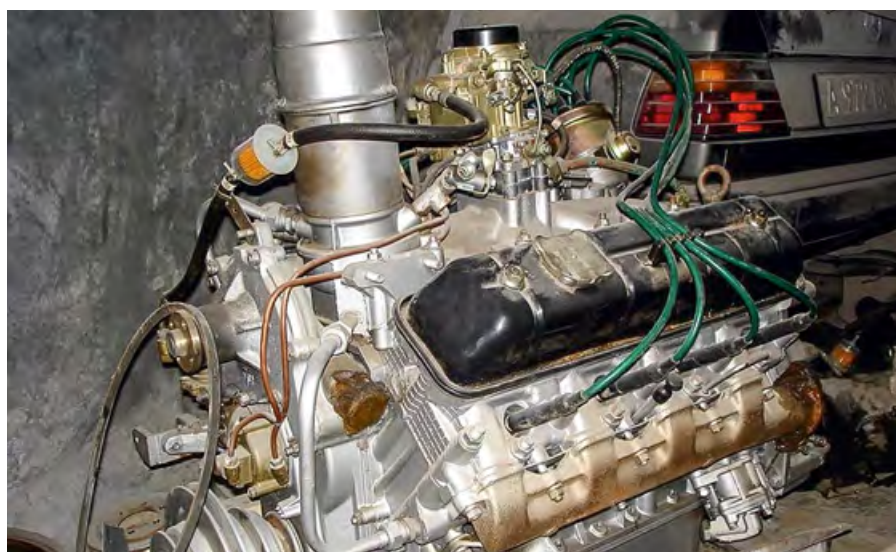


Рис. 3. Зависимость удельного эффективного расхода топлива от частоты вращения коленчатого вала поршневого двигателя [работающего на бензине ($\epsilon = 7,6$), пропане ($\epsilon = 15$) и метане ($\epsilon = 15$)]



Бензиновый V-образный восьмичлапанный двигатель ЗМЗ-523 («ГАЗовская восьмёрка»)

тренного сгорания. Выигрыш в расходе топлива (по сравнению с базовым двигателем) составляет в среднем 4 % и 13 %, соответственно, при использовании в качестве топлива пропана и метана.

Таким образом, положительный эффект от перевода бензинового двигателя на газомоторное топливо заключается в снижении расхода топлива, но при одновременной потере мощности. Известно, что повышение степени сжатия в поршневых ДВС имеет ряд преимуществ, в частности, уменьшение g_e и рост N_e , что связано с увеличением термического КПД и улучшением условий для смесеобразования и сгорания топлива [13, 14]. Поэтому было исследовано влияние величины степени сжатия поршневых двигателей, переведённых на газомоторное топливо, на их технико-экономические показатели (рис. 2).

Установлено, что наиболее заметный рост мощности двигателя наблюдается при увеличении степени сжатия ϵ до 15,

после чего рост N_e становится малоаметным; при этом зависимость $g_e = f(\epsilon)$ имеет экстремум при рассматриваемой величине ϵ . Следовательно, можно предположить, что оптимальные значения степени сжатия для газопоршневых двигателей размерности 9,2/8,8 находятся в районе 14–16. Таким образом, было про-

Положительный эффект от перевода бензинового двигателя на газомоторное топливо заключается в снижении расхода топлива, но при одновременной потере мощности. Известно, что повышение степени сжатия в поршневых ДВС имеет ряд преимуществ, в частности, уменьшение g_e и рост N_e , что связано с увеличением термического КПД и улучшением условий для смесеобразования и сгорания топлива [13, 14]

изведено сравнение технико-экономических показателей базового бензинового ДВС ($\epsilon = 7,6$) и газопоршневых двигателей, работающих на пропане и метане, с $\epsilon = 15$ (рис. 3).

На основе численного моделирования установлено, что двигатель, работающий на метане, при $\epsilon = 15$ имеет мощность, фактически равную базовому бензиновому двигателю (отклонения N_e находятся в пределах $\pm 5\%$), при снижении расхода топлива на 20–30 %, в зависимости от режима работы ДВС. В свою очередь, при $\epsilon = 15$ у двигателя, работающего на пропане, наблюдается рост мощности по сравнению с базовым двигателем в диапазоне 5–15 % при одновременном уменьшении g_e на 10–20 %.

Для более корректного сравнения технико-экономических показателей поршневых ДВС, работающих на разных видах топлива, дополнительно было выполнено численное моделирование для бензинового двигателя, имеющего $\epsilon = 11$ (что вполне допустимо при работе на бензине с октановым числом 95–98) и газопоршневых двигателей, работающих на пропане и метане с $\epsilon = 15$ (рис. 4).

Установлено, что бензиновый двигатель с $\epsilon = 11$ и газопоршневой ДВС, работающий на пропане, с $\epsilon = 15$ имеют практически одинаковую эффективную мощность (отличия составляют $\pm 2\%$) во всём диапазоне частот вращения коленчатого вала; при этом газопоршневой двигатель имеет меньший расход топлива g_e на 4–10 %. В свою очередь, бензиновый ДВС с $\epsilon = 11$ имеет большие значения N_e по сравнению с двигателем, работающим на метане, на величину от 4 до 10 %.

Однако даже в этом случае газопоршневой двигатель на метане имеет существенно лучшую экономичность (снижение g_e вплоть до 20 %).

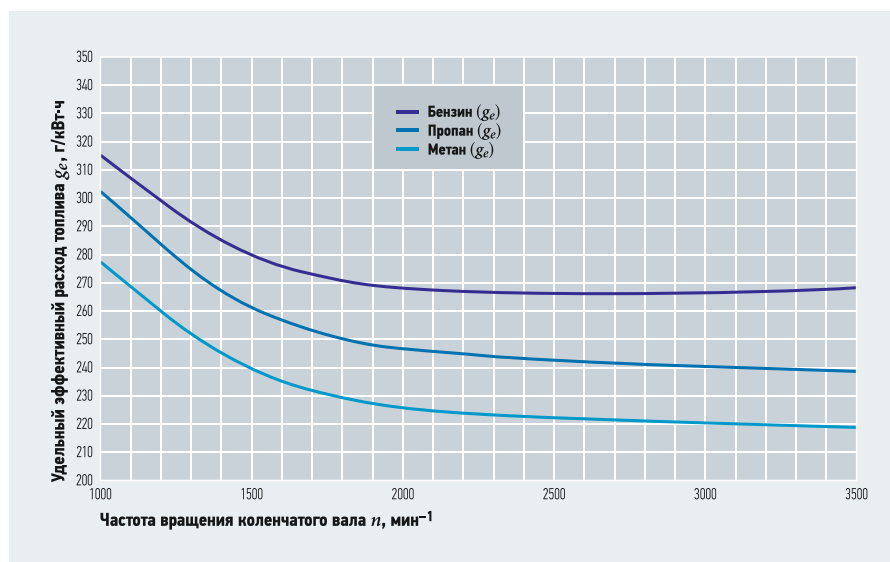


Рис. 4. Зависимость удельного эффективного расхода топлива от частоты вращения коленчатого вала поршневого двигателя [работающего на бензине ($\epsilon = 11$), пропане ($\epsilon = 15$) и метане ($\epsilon = 15$)]

Практический результат для автотранспортных предприятий

Для оценки положительного экономического эффекта от использования газомоторного топлива в поршневых ДВС рассмотрим первый вариант, когда базовый бензиновый двигатель был переведён на метан без увеличения степени сжатия.

Как было показано выше, в данном случае снижение удельного эффективного расхода топлива g_e составляет 12–14% (в среднем около 13%) при снижении мощности на 12%. Соответственно, на режиме средней нагрузки ($n = 2200$ мин⁻¹) массовый расход бензина для базового двигателя составляет 16,8 кг/ч, а для газопоршневого двигателя на метане — 12,9 кг/ч. Отсюда можно вычислить ежегодную величину экономии топлива для одного двигателя при условии эксплуатации его в течении 2000 моточасов в год (что приблизительно соответствует пробегу автомобиля в 50 тыс. км), которая составит примерно 8000 кг. А если учесть, что стоимость бензина составляет примерно 42 руб/кг, а метана — 15 руб/кг, то в количественном выражении экономия будет равняться около 1,1 млн руб. в год. Если же перевести на газ не один двигатель, а пять, то ежегодная экономия составит 5,5 млн руб.

Можно также рассчитать второй вариант, когда базовый бензиновый двигатель был переведён на метан, но уже с последующим увеличением степени сжатия до 15. Как было показано выше, в данном случае снижение удельного эффективного расхода топлива g_e составляет в среднем около 11% при фактически равных мощностях бензинового двигателя и газопоршневого. Установлено, что при ана-

логичном объёме эксплуатации одного двигателя ежегодная экономия топлива в данном случае составит 10 тонн или почти 1,2 млн. руб.

Следует отметить, что аналогичные расчёты для газопоршневого двигателя, работающего на пропане, показывают, что ежегодная экономия топлива для одного ДВС составит примерно 1,5 т, а выигрыш в рублях будет равняться чуть больше 700 тыс. руб.

Таким образом, на основании численного моделирования рабочего цикла поршневых ДВС размерности 9,2/8,8, работающих на разных видах топлива, наибольшую топливную экономичность имеет газопоршневой двигатель на метане со степенью сжатия 15.

Проведённое исследование показало, что существует значительный потенциал в повышении энергоэффективности поршневых двигателей, работающих на газомоторном топливе. И для его раскрытия требуются дальнейшие исследования по доводке рабочего процесса газопоршневых ДВС, как с помощью численного моделирования, так и на основе стендовых испытаний.

Заключение

На основе проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработаны математические модели рабочих циклов ДВС (применительно к двигателю 8Ч9,2/8,8), работающих на разных видах топлива (бензин, пропан, а также метан), в программном комплексе «Дизель-ПК».
2. На основании численного моделирования установлено, что перевод бензинового двигателя на газомоторное топ-

ливо приводит к снижению эффективной мощности в диапазоне 5–12% при уменьшении удельного эффективного расхода топлива на 4–13%.

3. Показано влияние величины степени сжатия на технико-экономические показатели газопоршневых двигателей при работе на разных режимах.

4. Установлено, что повышение степени сжатия газопоршневых ДВС с 7,6 до 15 улучшает их топливную экономичность до 30% по сравнению с базовым бензиновым двигателем.

5. Рассчитан количественный экономический эффект от перевода пяти двигателей на пропан и метан для небольшого автотранспортного предприятия.

Таким образом, проведённое исследование показало наличие значительного потенциала энергосбережения в области поршневого двигателестроения в случае использования в двигателях внутреннего сгорания газомоторного топлива. ●

1. Кавтарадзе Р.З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород: Монография. — М.: Изд-во МГТУ, 2011. 240 с.
2. Кавтарадзе З.Р., Кавтарадзе Р.З. Перспективы применения поршневых двигателей на альтернативных моторных топливах // Транспорт на альтернативном топливе, 2010. №1. С. 74–80.
3. Лукшо В.А., Козлов А.В., Теренченко А.С. Оценка показателей природного газа как моторного топлива в полном жизненном цикле // Транспорт на альтернативном топливе, 2011. №3. С. 4–9.
4. Лукшо В.А. Математическая модель термодинамического цикла газового двигателя // Транспорт на альтернативном топливе, 2012. №6. С. 54–65.
5. Лапушкин Н.А., Лисицын Е.Б. Математическая модель для описания действительных процессов в газовых и газодизельных двигателях // Грузовик, 2006. №4. С. 45–49.
6. Клементьев А.С., Бибииков М.Н., Филькин Н.М., Меркушев А.В. Исследование влияния степени сжатия при конвертации двигателя автомобиля ГАЗ-31105 «Волга» на газовое топливо // Транспорт на альтернативном топливе, 2010. №4. С. 14–17.
7. Клементьев А.С. Контрольные расходы топлива двигателя автомобиля Иж-27156, работающего на бензине и сжатом природном газе // Автомобильная промышленность, 2012. №2. С. 29–30.
8. Злотин Г.Н., Захаров В.А., Кузьмин А.В. Регулировка бензинового ДВС при переводе его на сжиженный нефтяной газ // Двигателестроение, 2007. №2. С. 29–31.
9. Amirante R., Distaso E., Tamburrano P., Reitz R.D. Laminar flame speed correlations for methane, ethane, propane and their mixtures, and natural gas and gasoline for spark-ignition engine simulations. International Journal of Engine Research. 2017. Vol. 18. No. 9. Pp. 951–970.
10. Barnstedt K., Ratzberger R., Grabner P., Eichlseder H. Thermodynamic investigation of different natural gas combustion processes on the basis of a heavy-duty engine. International Journal of Engine Research. 2016. Vol. 17. No. 1. Pp. 28–34.
11. Пашей П.С., Галышев Ю.В. Исследование влияния закрутки заряда на впуске на параметры газопоршневого двигателя // Известия Международной академии аграрного образования, 2017. №35. С. 93–99.
12. Бурцев Н.В., Бурцев В.А. Многотопливные газовые двигатели с элементами адаптивного управления // Газовая промышленность, 2008. №13. С. 68–73.
13. Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw-Hill, 1988. 458 p.
14. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Спец. главы: Учеб. для вузов. — М.: Изд-во МГТУ, 2008. 720 с. References — see page 96.

Evaluation of the fuel efficiency of piston engines after their transfer to gaseous fuel. Pp. 86–89.

Leonid V. Plotnikov, PhD, Associate Professor, Department of the Turbines and Engines, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU); **Andrey M. Kozubsky**, PhD, Chief Designer for hydraulic excavators of "Uralmashplant", JSC, Engineer of the "Lifting and transporting machines and robots" Department, UrFU; **Alexander G. Maksimenko**, Director of "Elitegas", LLC; **Leonid E. Osipov**, graduate student, Department of the Turbines and Engines, UrFU

1. Kavtaradze R.Z. *Teplotfizicheskie processy v dizel'nykh, konvertirovannykh na prirodnyy gaz i vodorod: Monografiya* [Thermophysical processes in diesel engines converted to natural gas and hydrogen: Monograph]. Moscow. Izd-vo MGTU [Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University]. 2011. 240 p. [In Russian]
2. Kavtaradze Z.R., Kavtaradze R.Z. *Perspektivy primeneniya porshnevnykh dvigatelej na al'ternativnykh motornykh toplivakh* [Prospects for the use of piston engines on alternative motor fuels]. *Transport na al'ternativnom toplive* ["Alternative fuel vehicles" Magazine]. 2010. No. 1. Pp. 74–80. [In Russian]
3. Luksho V.A., Kozlov A.V., Terenchenko A.S. *Ocenka pokazatelej prirodnogo gaza kak motor-nogo topliva v polnom zhiznennom tsikle* [Evaluation of natural gas as a motor fuel in the full life cycle]. *Transport na al'ternativnom toplive* ["Alternative fuel vehicles" Magazine]. 2011. No. 3. Pp. 4–9. [In Russian]
4. Luksho V.A. *Matematicheskaya model' termodinamicheskogo tsikla gazovogo dvigatelya* [Mathematical model of the thermodynamic cycle of a gas engine]. *Transport na al'ternativnom toplive* ["Alternative fuel vehicles" Magazine]. 2012. No. 6. Pp. 54–65. [In Russian]
5. Lapushkin N.A., Lisicyn E.B. *Matematicheskaya model' dlja opisanija dejstvitel'nykh process-ov v gazovykh i gazodizel'nykh dvigatel'nykh* [A mathematical model to describe the actual processes in gas and gas diesel engines]. *Gruzovik* ["A Truck" Magazine]. 2006. No. 4. Pp. 45–49. [In Russian]
6. Klement'ev A.S., Bibikov M.N., Fil'kin N.M., Merkushev A.V. *Issledovanie vlijaniya stepeni szhatija pri konvertacii dvigatelya avtomobilja GAZ-31105 "Volga" na gazovoe toplivo* [Research of the effect of compression when converting the engine of the car GAZ-31105 "Volga" on gas fuel]. *Transport na al'ternativnom toplive* ["Alternative fuel vehicles" Magazine]. 2010. No. 4. Pp. 14–17. [In Russian]
7. Klement'ev A.S. *Kontrol'nye rashody topliva dvigatelya avtomobilja IZH-27156, rabotajush-hego na benzine i komprimirovannom prirodnom gaze* [Control fuel consumption of an IZH-27156 engine operating on gasoline and compressed natural gas]. *Avtomobil'naja promyshlennost'* ["Automotive industry" Magazine]. 2012. No. 2. Pp. 29–30. [In Russian]
8. Zlotin G.N., Zaharov E.A., Kuz'min A.V. *Regulirovka benzinovogo DVS pri perevode ego na szhizhennyj nefjanoy gaz* [Adjusting the gasoline engine when converting it to liquefied petroleum gas]. *Dvigatelsestroenie* ["Engine building" Magazine]. 2007. No. 2. Pp. 29–31. [In Russian]
9. Amirante R., Distaso E., Tamburrano P., Reitz R.D. Laminar flame speed correlations for methane, ethane, propane and their mixtures, and natural gas and gasoline for spark-ignition engine simulations. *International Journal of Engine Research*. 2017. Vol. 18. No. 9. Pp. 951–970.
10. Barnstedt K., Ratzberger R., Grabner P., Eichlseder H. Thermodynamic investigation of different natural gas combustion processes on the basis of a heavy-duty engine. *International Journal of Engine Research*. 2016. Vol. 17. No. 1. Pp. 28–34.
11. Pacej P.S., Galyshev Ju.V. *Issledovanie vlijaniya zakrutki zarjada na vpuske na parametry gazo-porshnevo dvigatelya* [Research of the effect of charge swirling at the inlet on the parameters of a gas piston engine]. *Izvestija Mezhdunarodnoj akademii agrarnogo obrazovani-ja* ["News of the International Academy of Agrarian Education" Magazine]. 2017. No. 35. Pp. 93–99. [In Russian]
12. Burcev N.V., Burcev V.A. *Mnogotoplivnye gazovye dvigately s jelementami adaptivnogo up-ravlenija* [Multi-fuel gas engines with adaptive control elements]. *Gazovaja promyshlennost'* ["Gas industry" Magazine]. 2008. №13. Pp. 68–73. [In Russian]
13. Heywood J.B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York, USA. McGraw-Hill. 1988. 458 p.
14. Kavtaradze R.Z. *Teoriya porshnevnykh dvigatelej. Spec. glavy: Ucheb. dlja vuzov* [Theory of piston engines. Special chapters: A textbook for universities]. Moscow. Izd-vo MGTU [Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University]. 2008. 720 p. [In Russian]