

УДК 621.436

Сравнительный анализ альтернативных моторных топлив для дизелей

В.А. Марков, Е.В. Бебенин, С.П. Гладышев

Необходимость более широкого применения альтернативных моторных топлив обусловлена обостряющимися энергетическими и экологическими проблемами. Использование этих топлив позволяет обеспечить замещение нефтяных моторных топлив и уменьшить выбросы в атмосферу вредных веществ с отработавшими газами двигателей внутреннего сгорания. В статье проведено теоретическое исследование эффективности использования различных альтернативных топлив в дизельных двигателях тракторов разных классов. Рассмотрены: нефтяное дизельное топливо, его смесь с рапсовым маслом, чистое рапсовое масло, сжиженный нефтяной газ и компримированный природный газ. Выполнены расчеты годовой экономии и срока окупаемости при переходе от нефтяного дизельного топлива на альтернативные топлива. Показано, что наиболее экономически выгодным является применение в качестве моторного топлива природного газа и топлив, получаемых из растительных масел.

Ключевые слова: дизельный двигатель, дизельное топливо, альтернативное топливо, природный газ, рапсовое масло.

Comparative analysis of alternative motor fuels for diesel engines

V.A. Markov, E.V. Bebenin, S.P. Gladyshev

The growing demand for alternative motor fuels is dictated by aggravating energy and environmental problems. The replacement of conventional oil motor fuels with these fuels will reduce the emission of harmful exhaust gases of internal combustion engines in the atmosphere. However, the benefits of using alternative fuels are still insufficiently proved. In this paper, the effectiveness of using various alternative fuels in diesel engines of various classes of tractors is theoretically studied. Petroleum diesel fuel, its mixture with rapeseed oil, pure rapeseed oil, liquefied petroleum gas, and compressed natural gas are considered. Annual savings and payback period when changing from conventional petroleum diesel fuel to alternative fuels are calculated. It is shown that natural gas and fuels derived from vegetable oils are most economical to use.

Keywords: diesel engine, diesel fuel, alternative fuel, natural gas, rapeseed oil.

В настоящее время основная часть моторных топлив производится из полезных ископаемых, в основном из нефти. Среди различных видов транспорта (воздушного, морского, речного, железнодорожного и т. д.) ее доля особенно велика в автотранспорте, на потребности которого расходуется более 50% общего объема добытой нефти [1]. Среди всех видов наземного и водного транспорта около 64% расходуемых моторных топлив приходится на легковые и грузо-



МАРКОВ
Владимир Анатольевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

MARKOV
Vladimir Anatol'evich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



БЕБЕНИН
Евгений Викторович
(Саратовский
государственный аграрный
университет
(СГАУ) им. Н.И. Вавилова)

BEBENIN
Evgeniy Viktorovich
(Saratov, Russian Federation,
Saratov State Agrarian
University named
after N.I. Vavilov)



ГЛАДЫШЕВ
Сергей Павлович
(University of Michigan
Dearborn)

GLADYSHEV
Sergey Pavlovich
(Detroit, USA, University
of Michigan-Dearborn)

вые автомобили, автобусы (рис. 1) [2]. Примерно 12% моторных топлив потребляет сельское хозяйство. Вместе с тем наряду с нефтяными топливами все большее применение находят альтернативные виды топлива [1, 3–6].

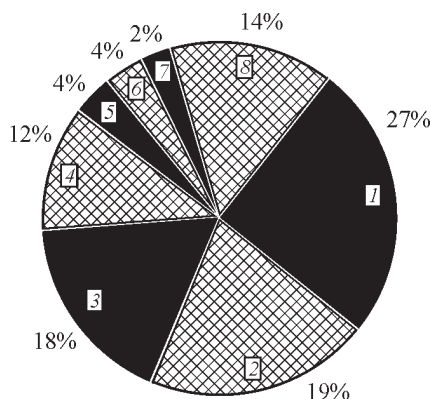


Рис. 1. Расход моторного топлива в России по категориям потребителей:

- 1 — легковые автомобили; 2 — грузовые автомобили;
 3 — автобусы; 4 — сельское хозяйство;
 5 — жилищно-коммунальное хозяйство;
 6 — железнодорожный транспорт; 7 — водный транспорт;
 8 — прочие потребители

К 2020 г. в Европе планируется перевести около четверти (23%) всего автомобильного парка на альтернативные топлива: природный газ — 10% (23,5 млн автомобилей), биогаз — 8% (18,8 млн автомобилей), водород (топливные элементы) — 5% (11,7 млн автомобилей) [1, 7]. Прогноз использования альтернативных топлив за рубежом, в том числе из возобновляемых источников энергии, приведен на рис. 2 [2].

Повышенный интерес к проблеме использования альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания обусловлен как истощением нефтяных ресурсов и повышением цен на нефть и нефтепродукты, так и назревшей необходимостью решения острых экологических проблем, вызванных быстрым ростом числа транспортных средств. Альтернативные топлива условно можно разделить на три группы: 1) смешанные топлива, содержащие нефтяные топлива с добавками ненефтяного происхождения (растительными маслами, спиртами, эфирами и др.); 2) синтетические жидкие топлива, получаемые при переработке твердых, жидких или газообраз-

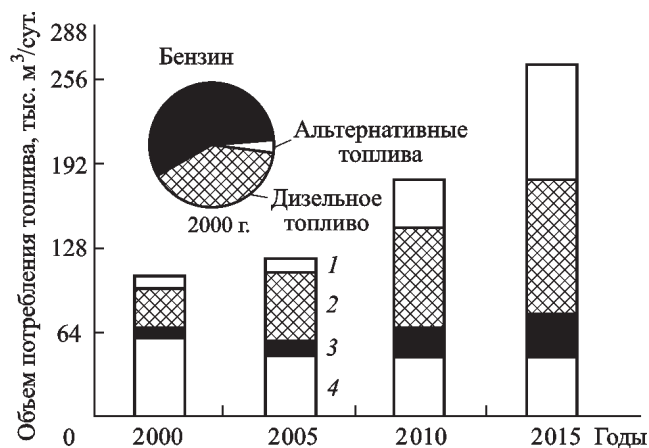


Рис. 2. Прогноз использования альтернативных топлив:

- 1 — синтетические топлива (продукты переработки по технологии GTL — Gas to Liquid); 2 — этанол;
 3 — биодизельное топливо (растительные масла и их эфиры); 4 — МТБЭ (метил-трет-бутиловый эфир) и др.

ных полезных ископаемых (угля, горючих сланцев, природного газа и газовых конденсатов и т. д.); 3) ненефтяные топлива — растительные масла спирты, эфиры, газообразные топлива (компримированный природный газ, сжиженный нефтяной газ, диметиловый эфир, водород и др.).

Следует отметить, что альтернативные топлива третьей группы обычно имеют физико-химические свойства, отличные от свойств нефтяного дизельного топлива (ДТ), являющегося основным видом топлива, для дизельных двигателей (таблица) [1, 8]. Поэтому при их использовании необходима адаптация этих топлив к транспортировке, хранению и заправке на существующих автомобильных заправочных станциях (АЗС), использованию в дизельных двигателях.

Для дизельных двигателей сельскохозяйственных машин выбор альтернативных топлив имеет свою специфику. Продолжающийся рост цен на нефтяные моторные топлива привел к тому, что в структуре затрат на производство сельскохозяйственной продукции доля стоимости ДТ уже превышает 30% [9]. Это обуславливает не только нарушение технологий сельскохозяйственного производства и увеличение стоимости продуктов питания, но и сокращение посевных площадей и поголовья животных, а также ведет к разорению предприятий агропромышленного комплекса различных форм собственности. Сложившаяся ситуация

Физико-химические свойства различных топлив

Физико-химические свойства топлива	Топливо						
	ДТ	КПГ (метан)	СНГ (пропан)	Метанол	ДМЭ	РМ	МЭРМ
Формула состава	$C_{16,2}H_{28,5}^*$	CH_4	C_3H_8	CH_3OH	CH_3OCH_3	—	$C_{19,6}H_{36,6}O_2^*$
Плотность при 20 °С, кг/м ³	830	416**	490**	795	668**	916	877
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	3,8	—	0,17**	0,55	0,22**	75	8
Коэффициент поверхностного натяжения при 20 °С, мН/м	27,1	33,2	—	—	12,5	33,2	30,7
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	42,5	50,3	46,5	20,1	28,9	37,3	37,8
Цетановое число	45	3	16	3	55—60	36	48
Температура самовоспламенения, °С	250	540	487	464	235	318	230
Температура помутнения, °С	–25	—	—	—	—	–9	–13
Температура застывания, °С	–35	—	—	–97,9	—	–20	–21
Температура кипения, °С	180—360	–161,5	–42	64,5	–25	—	—
Теплота испарения при температуре кипения, кДж/кг	250	511	427	1115	467	—	—
Давление насыщенных паров при 0,1 МПа и 20 °С, МПа	—	21,4	0,84	0,013	0,51	—	—
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,3	17,2	15,7	6,4	9,0	12,5	12,6
Содержание, % по массе:							
С	87,0	76,0	81,8	37,5	52,2	77,0	77,5
Н	12,6	24,0	18,2	12,5	13,0	12,0	12,0
О	0,4	0	0	50,0	34,8	11,0	10,5
Общее содержание серы, % по массе	0,20	—	0,015	—	—	0,002	0,002

Примечание. «—» — свойства не определялись; ДТ — дизельное топливо; КПГ — компримированный природный газ; СНГ — сжиженный нефтяной газ; ДМЭ — диметиловый эфир; РМ — рапсовое масло; МЭРМ — метиловый эфир рапсового масла.

*Условная формула состава.

** Плотность и вязкость жидкой фазы.

грозит потерей продовольственной безопасности страны и полной зависимостью от ввозимого продовольствия. В связи с этим в настоящее время разработан и внедрен ряд технологий использования альтернативных видов топлива: биотоплива, газообразного топлива и др. Однако приоритетное внедрение того или иного альтернативного топлива в сельскохозяйственное производство должно базироваться на всесторонней оценке преимуществ и недостатков конвертирования двигателей внутреннего сгорания на этот вид топлива и использования его для сельскохозяйственной техники. Поэтому целесообразнее выбрать наиболее выгодное, в экономическом плане, альтернативное топливо и сконцентри-

ровать усилия на его более широком внедрении в автотракторное хозяйство страны.

Таким образом, экономическое обоснование приоритетного направления широкомасштабного внедрения альтернативного топлива является актуальной задачей. При этом целесообразно провести теоретическое исследование эффективности использования альтернативных топлив различными классами тракторной техники (тракторов различных тяговых классов).

В исследовании рассмотрены наиболее востребованные в настоящее время тракторы К-700А (тяговый класс 50 кН), Т-150 (тяговый класс 30 кН), ДТ-75 (тяговый класс 30 кН), МТЗ-80 (тяговый класс 14 кН). Использован-

ная методика определения экономической эффективности является стандартной [10] и достаточно распространенной при определении основных экономических показателей сельскохозяйственной техники. В ней учитываются основные технико-экономические показатели: часовая производительность, затраты труда на единицу выполненной работы, удельный расход энергоресурсов и расчет себестоимости единицы работы. Для наибольшей объективности проводимого теоретического исследования были приняты значения указанных выше технико-экономических параметров, характерных для самого распространенного вида сельскохозяйственной операции — вспашки (при агрегатировании перечисленных выше тракторов плугами марки ПЛН в соответствии с тяговым классом этих тракторов). Расчет производился из условия годовой загрузки сельхозмашин, равной 500 ч, норма амортизационных отчислений на трактор установлена в размере 18,5%, а часовая тарифная ставка принята равной 51,7 руб. [11].

При расчетах исследованы традиционное нефтяное ДТ и следующие виды альтернативных топлив: смесь В20 (смесь 20% рапсового масла и 80% ДТ), чистое рапсовое масло, сжиженный нефтяной газ (пропан-бутановая смесь) и сжатый (компримированный) природный газ (метан). Расчетные данные годовой экономии при переходе от нефтяного ДТ на рассматриваемые альтернативные топлива приведены на рис. 3. Результаты расчета срока окупаемости конвертации тракторов на альтернативные топлива представлены на рис. 4. При расчетах рассмотрены системы питания тракторных двигателей газообразными топливами (метан и пропан-бутановая смесь) с их воспламенением от запальной дозы нефтяного ДТ, т. е. двойные системы питания дизелей. Срок окупаемости использования биотоплив (рапсовое масло и смесь В20) дан без периода выращивания и производства самого биотоплива.

Из представленных на рис. 3 и 4 данных следует, что в качестве альтернативного топлива наиболее экономически выгодным может стать применение природного газа (метана). Так, при конвертировании дизельного двигателя трактора МТЗ-80 на природный газ годовой эконо-

мический эффект составит около 400 тыс. руб. на один трактор (см. рис. 3). При этом срок окупаемости конвертации дизеля этого трактора на природный газ составляет всего полгода (см. рис. 4). Однако переоборудование тракторных двигателей для работы на этом виде топлива требует наибольших, по сравнению с применением других видов альтернативных топлив, капиталовложений. Результаты расчетных исследований также показывают, что применение альтернативных видов топлива целесообразно на недорогих видах техники, что делает их использование более привлекательным для малых и фермерских хозяйств. Близость значений технико-экономических характеристик тракторов Т-150 и ДТ-75 объясняется тем фактом, что эти трактора относятся к одному тяговому классу.

Проведенный анализ подтвердил эффективность использования в сельскохозяйственном производстве не только природного газа, но

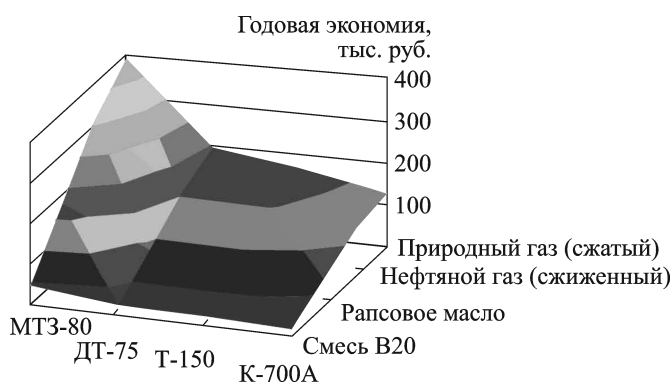


Рис. 3. Результаты расчета годовой экономии при использовании различных видов альтернативных топлив на основных марках сельскохозяйственных тракторов

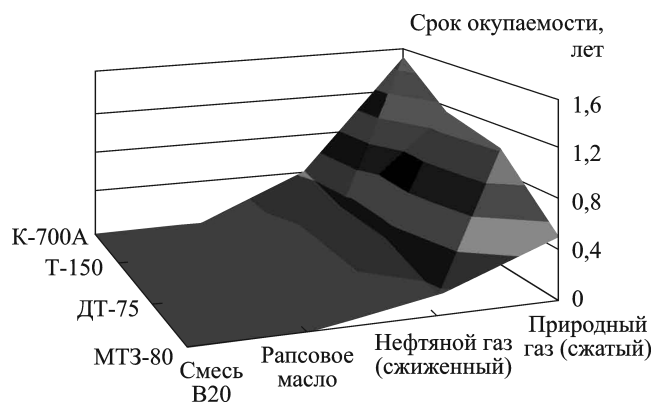


Рис. 4. Результаты расчета срока окупаемости конвертации сельскохозяйственных тракторов на различные виды альтернативных топлив

и других исследуемых видов альтернативных топлив: смеси рапсового масла с нефтяным ДТ (смесь В20), рапсового масла и сжиженного нефтяного газа. При этом необходимо отметить, что использование рассмотренных биотоплив практически не требует затрат на адаптацию двигателей к их применению, поскольку по своим физико-химическим свойствам они достаточно близки к традиционным нефтяным ДТ (особенно смесь В20).

В странах Евросоюза наблюдается ежегодное увеличение производства биотоплив. По оценкам журнала Oil World только в Германии ежемесячно около 80 тыс. т рапсового масла используется как прямой заменитель моторного топлива. И это без учета еще более значительных объемов потребления рапсового масла отраслью для производства МЭРМ. Показательны данные, представленные на рис. 5, — направления реализации биодизельных топлив в Германии [2]. В 2006 г. сбыт биодизельного топлива («биодизель», или метиловые эфиры растительных масел) в Германии составил 2,5 млн т, в том числе, 1,01 млн т было использовано как примесь к нефтяному ДТ и 0,5 млн т реализовано через бензоколонки для легковых и грузовых автомобилей. Кроме этого, в качестве моторного топлива был использован 1 млн т рапсового масла.

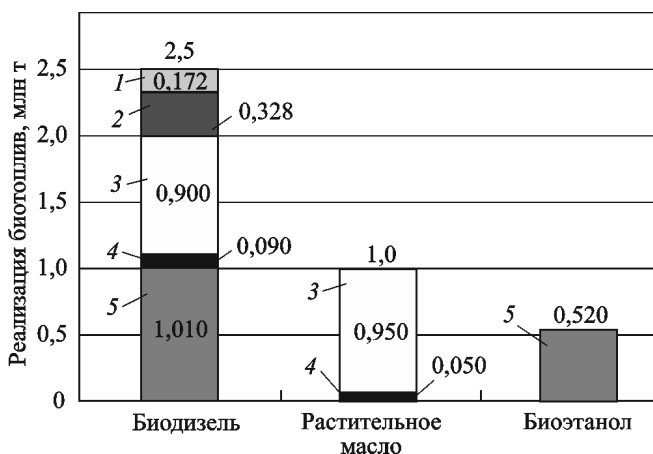


Рис. 5. Объемы и направления реализации биотоплива в Германии:

- 1 — бензоколонки для легковых автомобилей;
- 2 — бензоколонки для грузовых автомобилей;
- 3 — транспортные компании и грузоперевозчики;
- 4 — сельское хозяйство; 5 — добавки к традиционному нефтяному топливу

Широкое внедрение того или иного вида топлива напрямую зависит от соотношения цен на нефтяное ДТ и рассматриваемого альтернативного топлива. При этом отмечается практически непрерывный рост цен на нефтяное ДТ (рис. 6). За последние 12 лет эта цена увеличилась более чем в 2 раза.

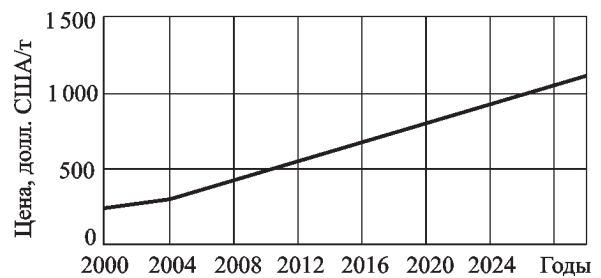


Рис. 6. Динамика роста оптовых цен на ДТ в России

Однако следует отметить и практически непрерывное увеличение цен на растительные масла и, в частности, на рапсовое масло. В настоящее время розничная цена 1 л рапсового масла составляет около 1 долл. США (рис. 7). Пока розничная цена на растительное масло несколько превышает розничную цену на нефтяное ДТ. Вместе с тем, в последние годы отмечается сближение цен на эти энергоносители, что позволяет признать перспективность использования растительных масел в качестве моторных топлив. Особенно это относится к агропромышленным комплексам, где растительные масла являются побочным продуктом получения жмыха и шротов для откорма крупного рогатого скота. К тому же при этом сокращаются расходы на транспортировку моторного топлива.

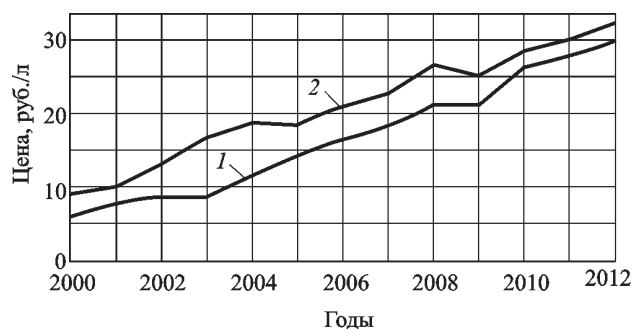


Рис. 7. Динамика роста розничных цен на ДТ (1) и рапсовое масло (2) в г. Москве

В целом, проведенное исследование подтвердило, что применение природного газа (метана) и топлив, получаемых из растительных масел, в качестве альтернативного топлива уже в ближайшее время может стать экономически выгодным, что будет способствовать более широкому использованию этих видов топлива не только в сельском хозяйстве, но и на транспорте.

Литература

- [1] Александров А.А., Марков В.А., ред. *Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания*. Москва, ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012. 791 с.
- [2] *Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях*. Москва, ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2011. 536 с.
- [3] Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. *Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания*. Москва, Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. 311 с.
- [4] Патрахальцев Н.Н. *Повышение экономических и экологических качеств двигателей внутреннего сгорания на основе применения альтернативных топлив*. Москва, Изд-во РУДН, 2008. 267 с.
- [5] Гусаков С.В. *Перспективы применения в дизелях альтернативных топлив из возобновляемых источников*. Москва, РУДН, 2008. 318 с.
- [6] Knothe G. Analyzing Biodiesel: Standarts and Other Methods. *Journal of the American Oil Chemists' Society (JAOCs)*, 2006, vol. 83, no. 10, pp. 823–833.
- [7] Хачиян А.С. Применение различных топлив и энергетических установок в автомобилях будущего. *Двигателестроение*, 2004, № 1, с. 28–31.
- [8] Гайворонский А.И., Марков В.А., Илатовский Ю.В. *Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях*. Москва, ООО «ИРЦ Газпром», 2007. 480 с.
- [9] Коцарь Ю.А., Головащенко Г.А., Плужников С.В., Коростышевский И.М. Новые источники сырья для биодизеля. *Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо*, 2011, № 4, с. 23–24.
- [10] ГОСТ Р 53056—2008. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. Москва, Стандартинформ, 2009. 33 с.
- [11] Бебенин Е.В. *Совершенствование топливной системы тракторных дизелей для работы по газодизельному циклу на примере трактора РТМ-160*. Дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2009. 136 с.

References

- [1] Aleksandrov A.A., Arkharov I.A., Bagrov V.V., Gaivoronskii A.I., Grekhov L.V., Devianin S.N., Ivashchenko N.A., Markov V.A.

Информация об авторах

МАРКОВ Владимир Анатольевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: markov@power.bmstu.ru).

БЕБЕНИН Евгений Викторович (Саратов) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Товароведение и коммерция». Саратовский государственный аграрный университет (СГАУ) им. Н.И. Вавилова (410012, Саратов, Российская Федерация, Театральная пл., 1).

ГЛАДЫШЕВ Сергей Павлович (Детройт) — доктор технических наук, профессор, Лектор электроинженерного факультета Мичиганского университета (4901, Детройт, США, Evergreen Road Dearborn, Michigan 48128—1491).

Information about the authors

MARKOV Vladimir Anatol'evich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Thermal Physics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: markov@power.bmstu.ru).

BEBENIN Evgeniy Viktorovich (Saratov) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Merchandizing and Commerce» Department. Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov (SSAU, Teatral'naya sq., 1, 410012, Saratov, Russian Federation).

GLADYSHEV Sergey Pavlovich (Detroit) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Lecturer of «Electrical and Computer Engineering» Department. University of Michigan-Dearborn (UM-Dearborn, 4901 Evergreen Rd, Dearborn, MI 48128, United States).

Al'ternativnye topliva dlia dvigatelei vnutrennego sgoraniia [Alternative fuels for internal combustion engines]. Moscow, ООО NITs Inzhener publ., ООО Oniko-M publ., 2012. 791 p.

[2] Markov V.A., Devianin S.N., Semenov V.G., Shakhov A.V., Bagrov V.V. *Ispol'zovanie rastitel'nykh masel i topliv na ikh osnove v dizel'nykh dvigateliakh* [The use of vegetable oils and fuels based on their diesel engines]. Moscow, ООО NITs Inzhener publ., ООО Oniko-M publ., 2011. 536 p.

[3] L'otko V., Lukanin V.N., Khachiiian A.S. *Primenenie al'ternativnykh topliv v dvigateliakh vnutrennego sgoraniia* [The use of alternative fuels in internal combustion engines]. Moscow, МАДИ (STU) publ., 2000. 311 p.

[4] Patrakhal'tsev N.N. *Povyshenie ekonomicheskikh i ekologicheskikh kachestv dvigatelei vnutrennego sgoraniia na osnove primeneniia al'ternativnykh topliv* [Increasing economic and environmental qualities of internal combustion engines based on the use of alternative fuels]. Moscow, Peoples' Friendship University of Russia publ., 2008. 267 p.

[5] Gusakov S.B. *Perspektivy primeneniia v dizeliakh al'ternativnykh topliv iz vozobnovliaemykh istochnikov* [Prospects for use in diesel engines of alternative fuels from renewable sources]. Moscow, Peoples' Friendship University of Russia publ., 2008. 318 p.

[6] Knothe G. Analyzing Biodiesel: Standards and Other Methods. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2006, vol. 83, no. 10, pp. 823–833.

[7] Khachiiian A.S. *Primenenie razlichnykh topliv i energeticheskikh ustanovok v avtomobiliakh budushchego* [Alternative Fuels and Power Units in Cars of Tomorrow]. *Dvigatelistroenie* [Dvigatelistroyeniye]. 2004, no. 1, pp. 28–31.

[8] Gaivoronskii A.I., Markov V.A., Ilatovskii Iu.V. *Ispol'zovanie prirodnogo gaza i drugikh al'ternativnykh topliv v dizel'nykh dvigateliakh* [Use of natural gas and other alternative fuels in diesel engines]. Moscow, ООО IRTs Gazprom publ., 2007. 480 p.

[9] Kotsar' Iu.A., Golovashchenko G.A., Pluzhnikov S.V., Korostyshevskii I.M. *Novye istochniki syr'ia dlia biodizelia* [The new sources for bio-diesel]. *Avtogazozapravochnyi kompleks + al'ternativnoe топливо* [Complex + autogas alternative fuel]. 2011, no. 4, pp. 23–24.

[10] *GOST R 53056—2008. Tekhnika sel'skokhoziaistvennaia. Metody ekonomicheskoi otsenki* [GOST R 53056-2008. Agricultural engineering. Methods of economic evaluation]. Moscow, Standartinform publ., 2009. 33 p.

[11] Bebenin E.V. *Sovershenstvovanie toplivnoi sistemy traktornykh dizelei dlia raboty po gazodizel'nomu tsiklu na primere traktora RTM-160*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the fuel system of tractor diesel engines to operate on dual fuel cycle for example tractor RTM-160. Cand. tehn. sci. diss.]. Saratov, 2009. 136 p.

Статья поступила в редакцию 04.02.2014