

Биотопливо или дымящие автомобили?

© 2021. В. А. Лиханов, д. т. н., профессор, О. П. Лопатин, д. т. н., профессор,
Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский пр., д. 133,
e-mail: nirs_vsaa@mail.ru

Обоснована необходимость использования экологичного биотоплива для автотранспортных средств. Проанализированы возможности и пути использования в них биотоплива на основе спиртов (метанола, этанола), рапсового масла и метилового эфира рапсового масла. Рассмотрены физические процессы, доказывающие эффективность и надёжное снижение сажевого содержания в выхлопных газах (ВГ) автомобилей при использовании указанных биотоплив. Для глубокого понимания основных механизмов образования сажевых частиц рассмотрены процессы их роста, морфология и микроструктура агрегатных состояний. Описаны снимки агломератов частиц сажи, сделанных с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, характеризующие как более, так и менее разветвлённые агрегаты, состоящие из десятков и сотен сферических или почти сферических первичных частиц. Доказано, что объединение (слипание) сажевых частиц до гранул является техническим моментом удаления агрегатной структуры, которая и определяет характер рассеивания первичных частиц.

Представлены результаты теоретических исследований дымности ВГ дизелей, работающих на биотопливе с помощью расчётного метода по ацетиленовой теории. Экспериментально получено эффективное снижение не только дымности ВГ двигателей путём применения экологических биотоплив, но и уменьшение практически всего спектра токсичных компонентов при сохранении мощностных показателей работы двигателя. При этом необходимо отметить полное (на 100%) замещение нефтяного моторного топлива альтернативным, что является безусловным преимуществом данных двигателей перед своими «коллегами», работающими на нефтяных топливах.

Ключевые слова: биотопливо после двигателя, автомобиль, двигатель, метанол, этанол, рапсовое масло.

Biofuels or smoking cars?

© 2021. V. A. Likhanov ORCID: 0000-0003-3033-7176, O. P. Lopatin ORCID: 0000-0002-0806-6878,
Vyatka State Agrotechnological University,
133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,
e-mail: nirs_vsaa@mail.ru

The necessity of using eco-friendly biofuels for motor vehicles is justified. The possibilities and ways of using biofuels based on alcohols (methanol, ethanol), rapeseed oil and rapeseed oil methyl ether are analyzed. The physical processes that prove the effectiveness and reliable reduction of soot content in the exhaust gases (EG) of cars when using these biofuels are considered. For a deep understanding of the main mechanisms of formation of soot particles, the processes of their growth, morphology and microstructure of aggregate states are considered. Images of soot particle agglomerates taken using high-resolution transmission electron microscopy are described, which characterize both more and less branched aggregates consisting of tens and hundreds of spherical or almost spherical primary particles. It is proved that the union (coalescence) of soot particles to granules is the technical moment of removing the aggregate structure, which determines the nature of the dispersion of primary particles.

The results of theoretical studies of the smoke content of EG diesel engines running on biofuels using the calculation method according to the acetylene theory are presented. An effective reduction of not only the smoke content of EG engines through the use of ecological biofuels, but also a reduction of almost the entire spectrum of toxic components while maintaining the power performance of the engine was experimentally obtained. At the same time, it is necessary to note the complete (100%) replacement of oil motor fuel with alternative fuel, which is an absolute advantage of these engines over their “colleagues” working on oil fuels.

Keywords: biofuel engine, car, engine, methanol, ethanol, rapeseed oil.

Неизбежность экологического и энергетического кризисов, вызванных неуклонным ростом потребления исчерпаемых энергоресурсов, вынуждает человечество искать альтернативные возобновляемые источники

энергии и пути снижения энергозависимости от исчерпаемых топлив [1–3].

Несмотря на повсеместное внедрение энергосберегающих технологий, суммарное мировое потребление энергии человечеством

растёт. К 2040 г. основным энергетическим источником на планете останутся исчерпаемые углеводороды (рис. 1) [4, 5].

По оценкам международного энергетического агентства доля биотоплив к 2050 г. в транспортной сфере может возрасти до 750 млн т в нефтяном эквиваленте и составить 27% всего топлива, используемого транспортом [6].

Россия обладает значительным потенциалом в области развития производства возобновляемых источников энергии, в том числе крупнейшей в мире площадью пахотных земель. В энергетической стратегии России на период до 2030 г. отмечается необходимость обеспечить рациональный, экономически обоснованный рост использования альтернативных видов топлива для транспорта и энергетики [7, 8].

Перспективным направлением развития современной энергетики является использование биотопливных технологий, доля которых в мировой структуре потребления топлив неуклонно растёт. Одним из основных потребителей энергии традиционно является транспортная отрасль, на которую приходится более четверти от общего потребления. При этом доля нефти и нефтепродуктов в структуре потребления топлива автомобильным транспортом в развитых странах составляет до 95% [9].

Повышенная экологическая опасность нефтяных топлив и продуктов их сгорания в городах-миллионниках и не только представляет собой проблему, решение которой может

быть только комплексным, включающим в себя создание новых биотоплив с экологически улучшенными характеристиками. Конвертация автомобиля с нефтяного на биотопливо позволит существенно снизить экологическую нагрузку особенно в мегаполисах, снижая экологический ущерб, наносимый окружающей среде (ОС), связанный с применением традиционных нефтяных топлив. Но для повсеместного применения биотоплива на автотранспорте необходимо должным образом обеспечить требуемые условия для его сгорания в сердце автомобиля – его двигателе [10].

Существуют два направления влияния на процессы сгорания топлива в двигателе автомобиля: изменение состава топлива и изменение процесса его сгорания. Первая проблема решается путём замены топлива на альтернативное либо введения в его состав различных добавок, улучшающих его экологические характеристики, вторая – путём введения присадок – катализаторов горения топлива. В качестве добавок или заменителей к нефтяному топливу особое место находят кислородсодержащие соединения – оксигенаты – простые алифатические спирты (метанол, этанол) и их эфиры. Добавки оксигенатных топлив в нефтяное топливо позволяют улучшить процесс сгорания, а, следовательно, снизить выбросы выхлопных газов (ВГ) в атмосферу. Использование кислородсодержащих добавок в топливе для автомобиля во многих странах мира заложено в государственные программы, предусматривающие улучшение

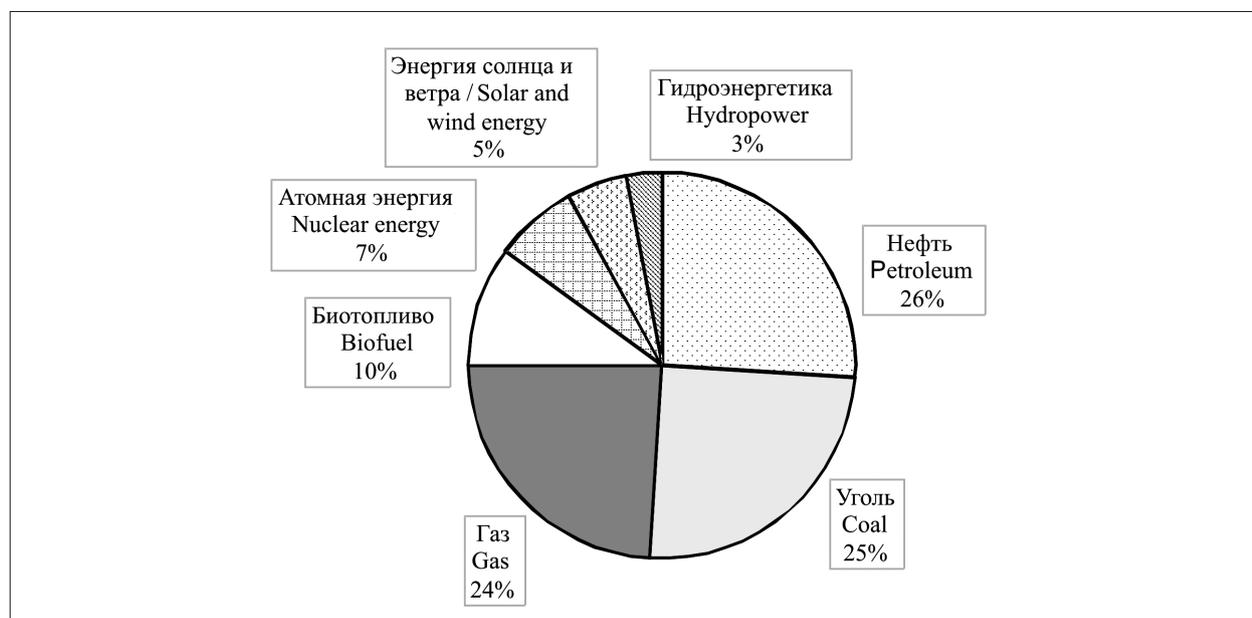


Рис. 1. Прогноз международного энергетического агентства на общемировое энергопотребление к 2040 г. / Fig. 1. International Energy Agency forecast for global energy consumption by 2040

экологической обстановки и использование в производственном цикле возобновляемых источников сырья. С этой точки зрения как нельзя лучше подходит метанол или этанол, получаемые из растительной биомассы и другими путями. Так, например, в Бразилии 90% всех выпускаемых двигателей рассчитаны на применение спиртовых топлив [11, 12].

При менее сложной структуре и меньших размерах молекул метанола и этанола во время их сгорания, в процессе распада снижается количество промежуточных химических соединений, которые могут являться токсичными. Кроме того, благодаря снижению содержания углерода по отношению к водороду, в процессе сгорания спиртовых биотоплив в меньшем количестве образуются оксиды углерода. По этой причине спирты во время их сгорания не в такой степени, как нефтяное топливо, дымят и тем самым загрязняют ОС. Поэтому для надёжного снижения дымности ВГ автомобилей очень важную роль играет рассмотрение сложного механизма образования сажевых частиц [13].

Всестороннее изучение процессов сажеобразования в двигателе автомобиля связано с негативным воздействием этого явления на ОС. Сажа, выбрасываемая с ВГ, способна на своей поверхности адсорбировать другие продукты неполного сгорания топлива, в том числе вещества, обладающие канцерогенными свойствами. При быстром охлаждении часть высокомолекулярных углеводородов (в том числе бенз[а]пирен) не успевает пройти все стадии процесса окисления и осаждаются на поверхности сажевых частиц, что и определяет канцерогенную опасность сажи. Принято считать, что на 1 г сажи может конденсироваться более 1 мг бенз[а]пирена, который является канцерогеном первого класса опасности. Также в образцах сажи из ВГ автомобиля обнаруживаются тяжёлые углеводороды, сконденсированные в агломераты и превращённые в смолистые вещества [14, 15].

Попадая в атмосферу, частицы сажи, отличающиеся высокой стабильностью, способны несколько суток витать в воздухе, увеличивая тем самым опасность для человека. Попадая в лёгкие, вызывают раздражение, способствуют появлению злокачественных новообразований. Частицы малых размеров не выводятся из организма. Исследования показали, что сельскохозяйственные растения способны в значительном количестве улавливать сажу, которая существенно влияет на водный режим растений, снижая содержание воды в листьях

на 10–40% и увеличивая водный дефицит растений на 5–20% [16].

Целью работы является изучение снижения дымности ВГ автомобилей при использовании биотоплива.

Биотопливо

Существует множество способов снижения дымности автомобилей. Один из эффективных методов – применение биотоплива. Самые распространённые виды биологического топлива в мире – биоэтанол и биометанол, на которые приходится более 80% всего производимого в мире топлива из биологического сырья. Обеспечить производство этого спиртового биотоплива в России способен широкий спектр сырья пищевой и перерабатывающей промышленности. Главным образом это сахаро-, крахмалосодержащее сырьё и целлюлозосодержащая продукция (отходы переработки зерна, древесины, соломы и др.). Необходимо отметить, что топливный этанол, в отличие от пищевого, производится методом укороченной дистилляции, поэтому содержит метанол и сивушные масла, а также бензин, что снижает стоимость его производства и делает хорошей альтернативой традиционному топливу [17].

Широкое применение спиртов в качестве моторного топлива для автомобилей сдерживается тем обстоятельством, что по ряду физико-химических свойств они существенно отличаются от штатного топлива. Так, если мы говорим о биоэтаноле и биометаноле, то их цетановые числа в 7 и 11 раз ниже дизельного топлива, что требует специальных мер для воспламенения этих биотоплив в двигателе. Поэтому при использовании спиртовых биотоплив в дизелях используют различные приёмы, изменяют конструктивные параметры дизеля (изменение формы камеры сгорания, увеличение степени сжатия, повышение температуры воздушного заряда), используют свечи накаливания или зажигания, запальную (пилотную) порцию топлива и др. Но, с другой стороны, известно, что популярные среди автолюбителей бензины марок «Регуляр 92» и «Премиум 95» имеют значения октанового числа не более 92 и 95 соответственно. Октановое же число биоэтанола 108, а биометанола – 120, поэтому очевидно, что склонность к самовоспламенению этих спиртов ниже, а скорость горения их газоздушных смесей выше [18].

Применением биоспирта в двигателе автомобиля можно добиться существенного

снижения дымности ВГ. Чем больше доля используемого спирта, тем меньше содержание сажи в ВГ. Сажеобразование при горении биоспиртов интенсифицируется по мере повышения их молекулярной массы. Биометанол при горении не образует сажи, а в продуктах сгорания биоэтанола содержание сажи незначительно. Биоэтанол и биометанол обладают высокой теплотой парообразования, поэтому их испарение влечёт уменьшение температуры в предпламенной зоне крекинга, замедляя химические процессы образования зародышей сажистых частиц. Возникает водородное торможение радикально-цепных процессов высокотемпературного крекинга, известное как эффект Лангмюра. Водород как химический реагент способен активно воздействовать на процессы результирующего сажевыделения. В высокотемпературной фазе водород катализирует процесс ускоренного выгорания частиц сажи. При распаде молекул спирта система насыщается не только водородными радикалами, но и радикалами гидроксидной группы $\cdot\text{OH}$, которые замедляют процессы дегидрогенизации и способствуют обрыву цепей на стадиях образования радикалов зародышей частиц сажи. Очевидно, что наличие атома кислорода в молекуле этих спиртов сдерживает рост скорости цепной реакции образования зародышей сажи [19].

Установлено, что эти спирты способствуют подавлению образования сажи в перемешанных пламенах этилена. Добавление биоэтанола или биометанола снижает концентрацию основных предшественников полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) – бензола и пропаргилового радикала. Из анализа основных путей реакций, ведущих к образованию бензола, можно сделать вывод, что механизм подавления сажи главным образом состоит в снижении доли углерода, идущего на формирование сажевых зародышей [20].

Не менее перспективным для автолюбителей может быть топливо растительного происхождения из семян масличных культур (подсолнечник, соя, рапс, рыжик, горчица и т. д.). Выбор растительного масла в качестве сырья для получения биотоплива определяется факторами возделывания масличных культур, прежде всего природно-климатическими условиями, высокой урожайностью, многофункциональностью использования продуктов переработки. Растительные масла имеют близкие к дизельному топливу теплоту сгорания, цетановое и коксовое числа, зольность и содержание серы, однако заметно отлича-

ются по вязкости и плотности. Для получения растительных масел и производства биотоплива в Европе служит рапс, в США – соя, в Канаде – канола, в Индонезии и Филиппинах – пальмовое и кокосовое масло, в Индии – ятрофа, в Африке – соя и ятрофа, в Бразилии – касторовое масло. Преимущественной культурой для получения биотоплива в условиях России является подсолнечник и озимый рапс [21].

Рапсовое масло – маслянистая жидкость бурого цвета, приобретающая после рафинирования светло-жёлтый цвет. Оно представляет собой смесь моно-, ди- и триацилглицеринов, которые содержат в своём составе молекулы различных жирных кислот. Главное преимущество рапсового масла по сравнению с нефтяным топливом – его практически полная биоразлагаемость. Кроме того, рапсовое масло не содержит ПАУ, являющихся канцерогенами, но в его молекулах присутствуют атомы кислорода, что делает рапсовое масло потенциально более экологически безопасным топливом, а наличие большого количества атомов кислорода в молекулах жирных кислот способствует более полному сгоранию рапсового масла и отсутствию дымящего выхлопа автомобиля [22].

Разумеется, чтобы заправить свой автомобиль тем или иным биотопливом, необходимо пройти длительный процесс исследований, а если мы говорим о снижении дымности ВГ, то решение этой проблемы невозможно без изучения процессов сажеобразования в автомобильном двигателе.

Образование сажевых частиц

Для глубокого понимания основных механизмов образования и процессов роста сажевых частиц очень важны морфология и микроструктура их агрегатных состояний. На рисунке 2 представлены снимки агломератов частиц сажи, сделанных с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, на которых видны более или менее разветвлённые агрегаты, и каждый агломерат состоит из десятков до сотен сферических или почти сферических первичных частиц [23].

Кроме того, большинство первичных частиц сажи частично перекрывается со своими соседними первичными частицами во время слияния зародышей. Для точного анализа микроструктуры агрегатных частиц необходимо определять размер первичных частиц d_p и фрактальную размерность d_f . Раз-

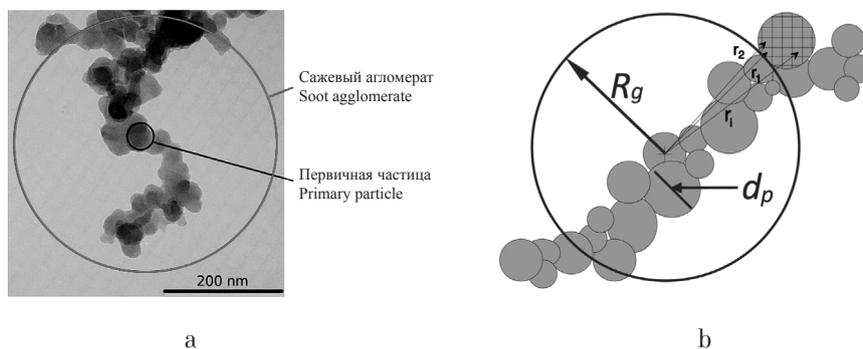


Рис. 2. Сажевые агломераты: а – изображения отобранных первичных агломератов сажи; б – схема определения размера первичных частиц d_p
Fig. 2. Soot agglomerates: а – images of selected primary soot agglomerates; б – scheme for determining the size of primary d_p particles

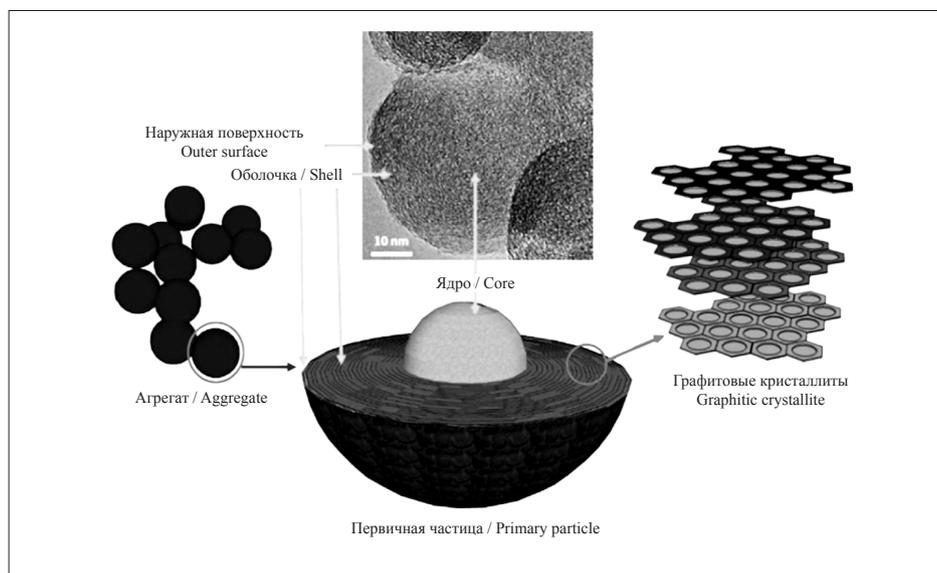


Рис. 3. Структура «оболочка-ядро» первичной частицы сажи при сгорании дизельного топлива
Fig. 3. The shell-core structure of the primary soot particle during the combustion of diesel fuel

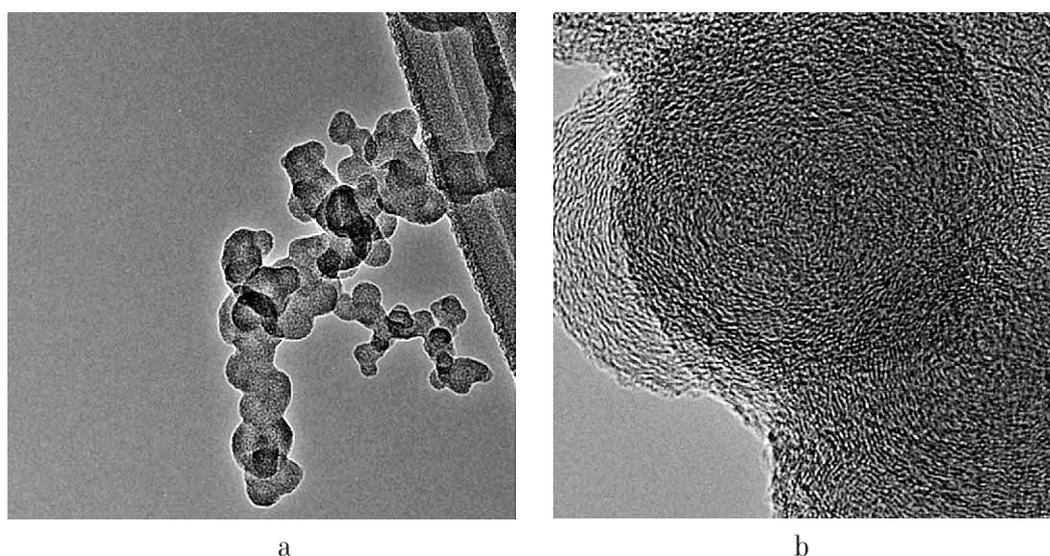


Рис. 4. Микрофотографии частиц сажи, полученные просвечивающей электронной микроскопией: а – агломерат; б – первичная частица
Fig. 4. Micrographs of soot particles obtained by transmission electron microscopy: а – agglomerate; б – primary particle

мер первичных частиц сажи d_p – это средний первичный диаметр, который может быть визуально определён с помощью просвечивающей электронной микроскопии изображений образцов. Фрактальная размерность является ключевым параметром при описании структуры агломератов и механизма их агломерации. Как правило, более высокое значение d_f представляет собой более сферическую структуру, в то время как меньшее значение d_f означает менее компактную и более разветвлённую [24].

На рисунке 3 в наномасштабе изображена частица сажи: внутреннее ядро и внешняя оболочка.

Внутреннее ядро содержит несколько мелких частиц с ядром, покрытых углеродными слоями турбостратной структуры, а внешняя оболочка состоит из графитовых кристаллитов, ориентированных параллельно внешней поверхности, что подтверждается результатами просвечивающей электронной микроскопии (рис. 4).

Таким образом, объединение (слипание) сажевых частиц до гранул является техническим моментом удаления агрегатной структуры, которая в противном случае определяет характер рассеяния первичных частиц. Текущая же методология размера первичных частиц сажи может быть определена с помощью просвечивающей электронной микроскопии,

показывающей, что первичные частицы сажи представляют собой глобулы размером около 20 нм. Микрофотографии просвечивающей электронной микроскопии с большим увеличением также показывают ранее описанные луковичные частицы, включённые в первичную структуру. Они имеют средний размер около 5 нм, и их достаточно сложно различать на необработанных кривых рассеивания [25].

Существуют различные мнения о том, что является первичным зародышем частицы – ПАУ или ацетилен. Существование большого количества алифатических соединений на ранних стадиях образования (в ядре частицы) подтверждает в большей степени ацетиленовую теорию, в которой ацетилен активно участвует в реакциях зарождения частицы и её поверхностного роста.

Снижение дымности автомобилей

На рисунках 5 и 6 представлены в сравнении результаты экспериментальных и теоретических исследований дымности ВГ дизеля, работающего на биоэтаноле с запальной порцией рапсового масла. На всём диапазоне значений среднего эффективного давления p_e (рис. 5) цикловая подача рапсового масла была установлена равной 13 мг/цикл (20%

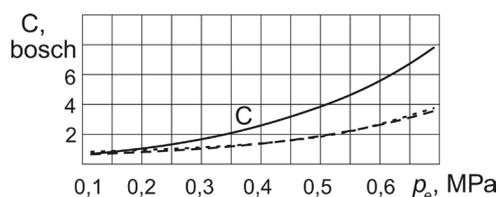


Рис. 5. Изменение дымности ВГ дизеля от нагрузки (p_e) [26]:

— — — — — дизельное топливо; — — — — — биоэтанол и рапсовое масло (теоретические исследования);
 - - - - - биоэтанол и рапсовое масло (экспериментальные исследования)

Fig. 5. Change in the smoke content of diesel EG from the load (p_e) [26]:

— — — — — diesel fuel; — — — — — bioethanol and rapeseed oil (theoretical studies);
 - - - - - bioethanol and rapeseed oil (experimental studies)

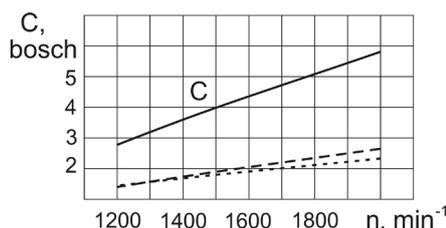


Рис. 6. Изменение дымности ВГ дизеля от частоты вращения коленчатого вала двигателя (n) [27]:

— — — — — дизельное топливо; — — — — — биоэтанол и рапсовое масло (теоретические исследования);
 - - - - - биоэтанол и рапсовое масло (экспериментальные исследования)

Fig. 6. Change in the smoke content of diesel EG from the engine crankshaft speed (n) [27]:

— — — — — diesel fuel; — — — — — bioethanol and rapeseed oil (theoretical studies);
 - - - - - bioethanol and rapeseed oil (experimental studies)

на номинальном режиме), а увеличение нагрузки осуществлялось изменением цикловой подачи биоэтанола. Теоретические результаты получены с помощью расчётного метода по ацетиленовой теории [26].

По результатам исследований работы дизеля на различных нагрузочных режимах можно сделать вывод, что с увеличением нагрузки происходит более эффективное снижение дымности ВГ. Так, на номинальном режиме ($p_e = 0,588$ МПа) это снижение составляет 3,8 раза.

Анализируя дымность ВГ дизеля при работе на биоэтаноле и рапсовом масле на различных скоростных режимах (рис. 6), следует отметить уменьшение сажесодержания в 3,2–3,8 раза.

Таким образом, применение биоэтанола и рапсового масла доказывает надёжное снижение дымности ВГ на всех нагрузочных и скоростных режимах работы при сохранении эффективных показателей двигателя.

На рисунке 7 представлены в сравнении результаты экспериментальных исследований

других токсичных компонентов ВГ дизеля, работающего на биоэтаноле с запальной порцией рапсового масла [27–29].

На всём диапазоне скоростей применение биоэтанола и рапсового масла приводит к снижению концентрации оксидов азота NO_x , суммарных углеводородов C_xH_y , монооксида углерода CO при незначительном росте диоксида углерода CO_2 .

На рисунке 8 изображены значения дымности ВГ дизеля при работе на биометаноле и метиловом эфире рапсового масла в зависимости от частоты вращения, анализ которой показывает, что перевод дизеля на указанное альтернативное топливо приводит к снижению сажесодержания более чем в 10 раз [30–32].

На рисунке 9 представлены нагрузочные характеристики дымности ВГ дизеля, работающего на биометаноле и метиловом эфире рапсового масла, анализ которых показывает, что в результате применения метанола и метилового эфира рапсового масла в качестве топлива на номинальном режиме происходит снижение выбросов оксидов азота на 47,4%,

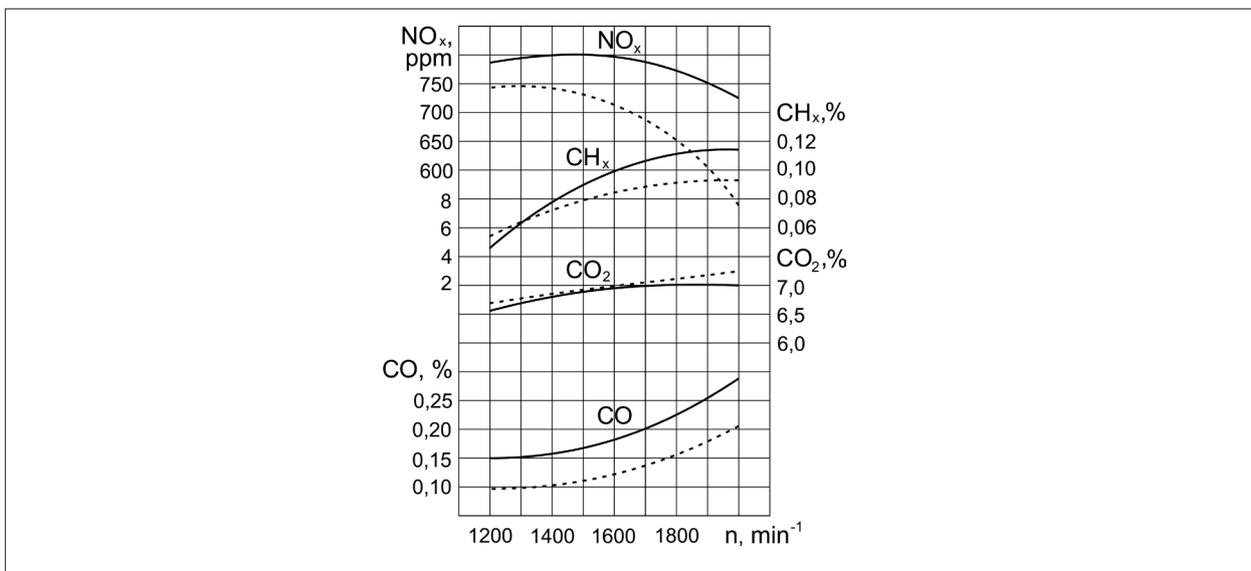


Рис. 7. Изменение токсичности ВГ дизеля от частоты вращения коленчатого вала двигателя [30]:

— дизельное топливо; - - - биоэтанол и рапсовое масло
 Fig. 7. Change in the toxicity of diesel EG from the engine crankshaft speed [30]:
 — diesel fuel; - - - bioethanol and rapeseed oil

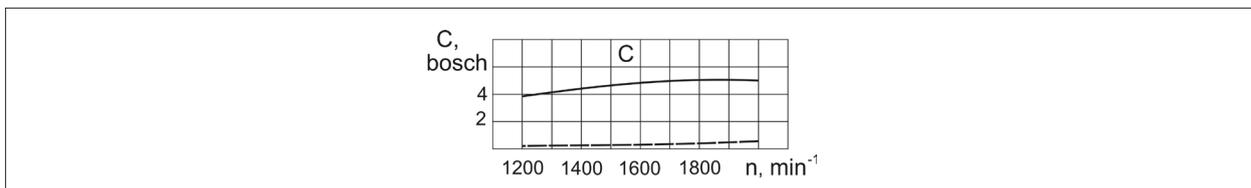


Рис. 8. Изменение дымности ВГ дизеля от частоты вращения коленчатого вала двигателя [33]:

— дизельное топливо; - - - биометанол (88%) и метиловый эфир рапсового масла (12%)
 Fig. 8. Change in the smoke content of diesel EG from the engine crankshaft speed (n) [33]:
 — diesel fuel; - - - biomethanol (88%) and rapeseed oil methyl ether (12%)

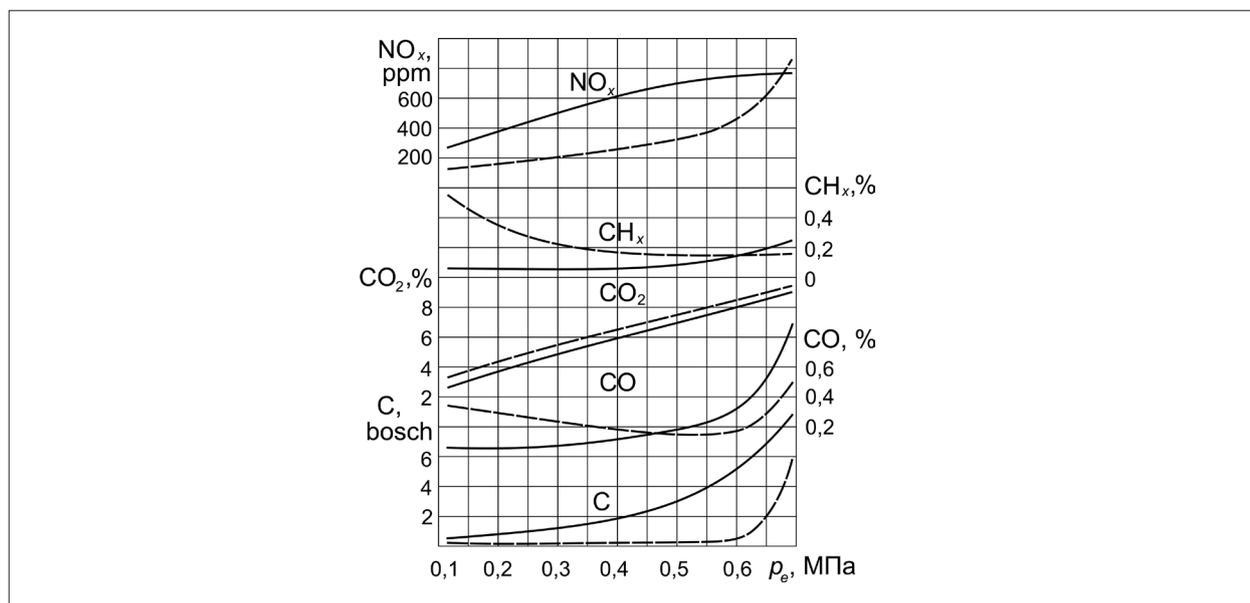


Рис. 9. Изменение токсичности ВГ дизеля от нагрузки (p_e) [33]: — дизельное топливо; — биометанол (88%) и метиловый эфир рапсового масла (12%)

Fig. 9. Change in the toxicity of diesel EG from the load (p_e) [33]: — diesel fuel; — biomethanol (88%) and rapeseed oil methyl ether (12%)

сажи – в 10,4 раза и оксида углерода – на 44,8% [33, 34].

Заклучение

В результате проведённых исследований доказано эффективное снижение дымности ВГ двигателей путём применения таких биотоплив как биоэтанол, биометанол, рапсовое масло, метиловый эфир рапсового масла. Кроме снижения дымности ВГ происходит уменьшение практически всего спектра токсичных компонентов при сохранении мощностных показателей работы двигателя.

Применение указанных биотоплив позволяет полностью (на 100%) заместить нефтяное моторное топливо альтернативным, что является безусловным преимуществом данных двигателей перед своими «коллегами», работающими на нефтяных топливах. Переоборудованные на биотопливо «чистые» двигатели – это будущее, к которому по нашему мнению должен стремиться каждый автолюбитель.

References

1. Ishak M.H.H., Ismail F., Mat S.C., Abdullah M.Z., Abdul Aziz M.S., Idroas M.Y. Numerical analysis of nozzle flow and spray characteristics from different nozzles using diesel and biofuel blends // *Energies*. 2019. V. 12. No. 2. Article No. 281. doi: 10.3390/en12020281
2. Lif A., Holmberg K. Water-in-diesel emulsions and related systems // *Advances in Colloid and Interface Sci-*

ence. 2006. V. 123. No. 126. P. 231–239. doi: 10.1016/j.cis.2006.05.004

3. Marchuk A., Likhanov V.A., Lopatin O.P. Alternative energy: methanol, ethanol and alcohol esters of rapeseed oil as ecofriendly biofuel // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 80–86 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-080-086

4. Thakur A.K., Kaviti A.K., Singh R., Gehlot A. An overview of butanol as compression ignition engine fuel // *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2020. V. 21. No. 4. P. 333–354. doi: 10.1615/INTERJEN-ERCLEANENV.2020033667

5. Algayyim S.J.M., Yusaf T., Wandel A.P., Hamawand I. Production and application of abe as a biofuel // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. V. 82. P. 1195–1214. doi: 10.1016/j.rser.2017.09.082

6. Shah P.R., Gaitonde U.N., Ganesh A. Influence of soy-lecithin as bio-additive with straight vegetable oil on ci engine characteristics // *Renewable Energy*. 2018. V. 115. P. 685–696. doi: 10.1016/j.renene.2017.09.013

7. Kuszewski H. Experimental investigation of the autoignition properties of ethanol–biodiesel fuel blends // *Fuel*. 2019. V. 235. P. 1301–1308. doi: 10.1016/j.fuel.2018.08.146

8. Al-Esawi N., Qubeissi M.A., Kolodnytska R. The impact of biodiesel fuel on Ethanol/Diesel blends // *Energies*. 2019. V. 12. No. 9. Article No. 1804. doi: 10.3390/en12091804

9. Kumar A.N., Kishore P.S., Raju K.B. Engine parameter optimization of palm oil biodiesel as alternate fuel in CI engine // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. V. 26. No. 7. P. 6652–6676. doi: 10.1007/s11356-018-04084-z

10. Erdiwansyah, Mamat R., Sani M.S.M., Sudhakar K., Kadarohman A., Sardjono R.E. An overview of higher alcohol and biodiesel as alternative fuels in engines // *Energy Reports*. 2019. V. 5. P. 467–479. doi: 10.1016/j.egyr.2019.04.009

11. Yesilyurt M.K. The effects of the fuel injection pressure on the performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel-diesel blends // *Renewable Energy*. 2019. V. 132. P. 649–666. doi: 10.1016/j.renene.2018.08.024
12. Sinyavski V.V., Shatrov M.G., Dunin A.Y. Results of simulation and experimental research of automobile gas diesel engine // *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019. V. 7. No. 1. P. 281–286. doi: 10.21533/pen.v7i1.396
13. Sivakumar M., Ramesh kumar R., Syed Thasthagir M.H. Effect of aluminium oxide nanoparticles blended pongamia methyl ester on performance, combustion and emission characteristics of diesel engine // *Renewable Energy*. 2018. V. 116. P. 518–526. doi: 10.1016/j.renene.2017.10.002
14. Zhang J., He L., Gong J. Effects of a nanoceria fuel additive on the physicochemical properties of diesel exhaust particles // *Environmental Sciences: Processes and Impacts*. 2016. V. 18. No. 10. P. 1333–1342. doi: 10.1039/c6em00337k
15. Chandra R., Kumar R. Fuel properties of some stable alcohol-diesel microemulsions for their use in compression ignition engines // *Energy and Fuels*. 2007. V. 21. No. 6. P. 3410–3414. doi: 10.1021/ef0701788
16. Sanli H., Canakci M., Alptekin E. Effects of waste-frying oil based methyl and ethyl ester biodiesel fuels on the performance, combustion and emission characteristics of a DI diesel engine // *Fuel*. 2015. V. 159. P. 179–187. doi: 10.1016/j.fuel.2015.06.081
17. Wu D., Wand W., Pang Z., Cao S., Yan J. Experimental investigation of spray characteristics of diesel-methanol-water emulsion // *Atomization and Sprays*. 2015. V. 25. No. 8. P. 675–694. doi: 10.1615/AtomizSpr.2015011524
18. Aydin F., Ogut H. Effects of ethanol-biodiesel-diesel fuel in single cylinder diesel engine to engine performance and emissions // *Renewable Energy*. 2017. V. 103. P. 688–694. doi: 10.1016/j.renene.2016.10.083
19. Datta A., Mandal B.K. Impact of alcohol addition to diesel on the performance combustion and emissions of a compression ignition engine // *Applied Thermal Engineering*. 2016. V. 98. P. 670–682. doi: 10.1016/j.appltherm-eng.2015.12.047
20. Titak W., Szwaja S., Lukacs K. Alcohol-diesel fuel combustion in the compression ignition engine // *Fuel*. 2015. V. 154. P. 196–206. doi: 10.1016/j.fuel.2015.03.071
21. Kurczyński D., Łagowski P. Performance indices of a common rail-system ci engine powered by diesel oil and biofuel blends // *Journal of the Energy Institute*. 2019. V. 92. No. 6. P. 1897–1913. doi: 10.1016/j.joei.2018.11.004
22. Asadi A., Mohammadi H., Khorand H., Zhang Y., Rui Z., Doranehgard M.H., Bozorg M.V. Combustion and emission characteristics of biomass derived biofuel, premixed in a diesel engine: a CFD study // *Renewable Energy*. 2019. V. 138. P. 79–89. doi: 10.1016/j.renene.2019.01.069
23. Popovicheva O., Persiantseva N., Timofeev M., Kireeva E., Engling G., Lin K.-T., Völk P., Hubert A., Wachtmeister G. Diesel/biofuel exhaust particles from modern internal combustion engines: microstructure, composition, and hygroscopicity // *Fuel*. 2015. V. 157. P. 232–239. doi: 10.1016/j.fuel.2015.04.073
24. Kopeika A.K., Golovko V.V., Zolotko A.N., Raslavičius L., Lubarskii V.M. Influence of biofuel additions on the ignition delay of single diesel fuel drops // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015. V. 88. No. 4. P. 948–957. doi: 10.1007/s10891-015-1269-4
25. Hoang A.T., Ölçer A.I., Nižetić S. Prospective review on the application of biofuel 2,5-dimethylfuran to diesel engine // *Journal of the Energy Institute*. 2021. V. 94. P. 360–386. doi: 10.1016/j.joei.2020.10.004
26. Hurtado B., Luna D., Bautista F.M., Luna C., Calero J., Romero A.A., Estevez R., Posadillo A., Hidalgo J.M. Synthesis, performance and emission quality assessment of ecodiesel from castor oil in diesel/biofuel/alcohol triple blends in a diesel engine // *Catalysts*. 2019. V. 9. No. 1. Article No. 40. doi: 10.3390/catal9010040
27. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Alcohol biofuels for internal combustion engine // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 548. Article No. 062041. doi: 10.1088/1755-1315/548/6/062041
28. Popovicheva O.B., Kireeva E.D., Shonija N.K., Vojtisek-Lom M., Schwarz J. FTIR analysis of surface functionalities on particulate matter produced by off-road diesel engines operating on diesel and biofuel // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. V. 22. No. 6. P. 4534–4544. doi: 10.1007/s11356-014-3688-8
29. Del Río J.I., Pérez W., Cardoño F., Marín J., Rios L.A. Pre-hydrogenation stage as a strategy to improve the continuous production of a diesel-like biofuel from palm oil // *Renewable Energy*. 2021. V. 168. P. 505–515. doi: 10.1016/j.renene.2020.12.086
30. Likhanov V.A., Lopatin O.P., Yurlov A.S., Anfilatova N.S. Investigation of the effective performance of diesel engines running on methanol and rapeseed oil methyl ether // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2021. V. 1889. Article No. 042067. doi: 10.1088/1742-6596/1889/4/042067
31. Labeckas G., Slavinskas S., Kanapkiene I. Study of the effects of biofuel-oxygen of various origins on a CRDI diesel engine combustion and emissions // *Energies*. 2019. V. 12. No. 7. Article No. 1241. doi: 10.3390/en12071241
32. Lapuerta M., Villajos M., Agudelo J.R., Boehman A.L. Key properties and blending strategies of hydrotreated vegetable oil as biofuel for diesel engines // *Fuel Processing Technology*. 2011. V. 92. No. 12. P. 2406–2411. doi: 10.1016/j.fuproc.2011.09.003
33. Lopatin O.P. Calculation of the process of nitrogen oxides formation during combustion of methanol in the engine // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 919. Article No. 062011. doi: 10.1088/1757-899X/919/6/062011
34. Iojoiu E., Lauga V., Abboud J., Legros G., Bonnetty J., Da Costa P., Schobing J., Brillard A., Leyssens G., Tschamber V., Anguita P., Vargas J.G., Retailleau L., Gil S., Giroir-Fendler A., Tarot M.L., Can F., Duprez D., Courtois X. Biofuel impact on diesel engine after-treatment: deactivation mechanisms and soot reactivity // *Emission Control Science and Technology*. 2018. V. 4. No. 1. P. 15–32. doi: 10.1007/s40825-017-0079-x