

Научная статья
УДК 621.436

Моделирование процесса распыливания смесового биотоплива с добавкой углеродных нанотрубок

Бовэнь Са¹, Владимир Анатольевич Марков², Сергей Николаевич Девянин³,
Всеволод Анатольевич Неверов⁴, Федор Сергеевич Карпец⁵,
Олег Николаевич Слепцов⁶

¹Cera Turbo (Beijing) Sci & Tech Co., Ltd, КНР

^{2,4,5,6}Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

¹bowensa@yandex.ru

²vladimir.markov58@yandex.ru

³devta@rambler.ru

⁴sevasxp@mail.ru

⁵likeeatmeat@gmail.com

⁶mabill@yandex.ru

Аннотация. Актуальным направлением достижения требуемых экологических показателей двигателей внутреннего сгорания является использование альтернативных топлив. В качестве перспективных альтернативных топлив для дизельных двигателей рассматриваются растительные масла и топлива на их основе. Для обеспечения приемлемых свойств таких биотоплив растительные масла обычно используются в смеси с нефтяным дизельным топливом. В статье исследована смесь 90% по массе нефтяного дизельного топлива и 10% подсолнечного масла. Для улучшения качества протекания рабочего процесса дизельного двигателя в это смесовое биотопливо добавлялось 1000 мг/л углеродных нанотрубок компании Timesnano (КНР). Для оценки качества распыливания этих смесей в дизельных двигателях проведено моделирование процесса распыливания упомянутых топлив в камеру постоянного объема с использованием программного комплекса Converge CFD. Результаты расчетных исследований показали, что добавление в смесь 90% нефтяного дизельного топлива и 10% подсолнечного масла углеродных нанотрубок приводит к увеличению диаметра капель распыливаемого топлива, что способствует некоторому увеличению длины струй распыливаемого топлива. Одновременно, это сопровождается небольшим увеличением угла конуса раскрытия струи. Следует отметить и лучшую испаряемость моторных топлив при добавлении в них углеродных нанотрубок. Эти эффекты обеспечивают лучшее качество процессов распыливания топлива и смесеобразования.

Ключевые слова: дизельный двигатель, дизельное топливо, подсолнечное масло, углеродные нанотрубки, смесовое биотопливо.

Для цитирования: Са Бовэнь, Марков В.А., Девянин С.Н., Неверов В.А., Карпец Ф.С., Слепцов О.Н. Моделирование процесса распыливания смесового биотоплива с добавкой углеродных нанотрубок // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №1(35).

Original article

Modeling of the atomization process of mixed biofuels with the addition of carbon nanotubes

**Bowen Sa¹, Vladimir A. Markov², Sergey N. Devyanin³, Vsevolod A. Neverov⁴,
Fyodor S. Karpets⁵, Oleg N. Sleptsov⁶**

¹Cera Turbo (Beijing) Sci & Tech Co., Ltd», China

^{2,4,5,6}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

¹bowensa@yandex.ru

²vladimir.markov58@yandex.ru

³devta@rambler.ru

⁴sevasxp@mail.ru

⁵likeeatmeat@gmail.com

⁶mabill@yandex.ru

Abstract. The actual direction of achieving the required environmental performance of internal combustion engines is the use of alternative fuels. Vegetable oils and fuels based on them are considered as promising alternative fuels for diesel engines. To ensure acceptable properties of such biofuels, vegetable oils are usually used in a mixture with petroleum diesel fuel. The article examines a mixture of 90% by weight of petroleum diesel fuel and 10% sunflower oil. To improve the quality of the diesel engine workflow, 1000 mg/l of carbon nanotubes from Timesnano (China) were added to this mixed biofuels. To assess the quality of atomization of these mixtures in diesel engines, a simulation of the process of atomization of these fuels into a constant volume chamber using the Converge CFD software package was carried out. The results of the calculated studies showed that the addition of 90% of petroleum diesel fuel and 10% of sunflower oil of carbon nanotubes to the mixture leads to an increase in the diameter of the droplets of the sprayed fuel, which contributes to a certain increase in the length of the sprayed fuel jets. At the same time, this is accompanied by a slight increase in the angle of the cone of the jet opening. It should also be noted the better evaporation of motor fuels when carbon nanotubes are added to them. These effects provide better quality of fuel atomization and mixing processes.

Keywords: diesel engine, diesel fuel, sunflower oil, carbon nanotubes, mixed biofuels.

For citation: Sa Bowen, Markov V.A., Devyanin S.N., Neverov V.A., Karpets F.S., Sleptsov O.N. Modeling of the atomization process of mixed biofuels with the addition of carbon nanotubes. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №1 (35).

Введение

Одним из основных направлений дальнейшего развития двигателестроения является адаптация двигателей внутреннего сгорания к работе на альтернативных топливах [1, 2, 3]. Особый интерес вызывает использование в двигателях альтернативных топлив, вырабатываемых из возобновляемого сырья – различных продуктов и отходов сельскохозяйственного производства [2, 4]. Применительно к дизельным двигателям в качестве перспективных биотоплив рассматриваются растительные масла и продукты их переработки [5, 6, 7]. Из-за различий физико-химических свойств нефтяного дизельного топлива (ДТ) и растительных масел последние целесообразно использовать в смесях с ДТ [5].

В Российской Федерации наиболее распространенным является подсолнечное масло (ПМ) [7, 8]. Оно может быть использовано в смесях с нефтяным ДТ в качестве моторного топлива для отечественных дизелей. Несмотря на имеющиеся проблемы использования таких смесевых топлив, отечественные и зарубежные исследователи продолжают работы по адаптации дизелей к работе на этих топливах [5, 9]. К этим проблемам относится проблема организация распыливания биотоплива в камере сгорания (КС) дизеля [10, 11]. Протекание этого процесса может быть заметно улучшено при добавлении в смесевые биотоплива углеродных нанотрубок (УНТ) [12]. Целью исследования является моделирование и расчетное исследование процесса распыливания при использовании смесевого биотоплива с добавкой углеродных нанотрубок.

Методика моделирование процесса распыливания смесевого биотоплива с добавкой углеродных нанотрубок

При расчетах исследовано смесевое биотопливо, содержащее 90% по объему нефтяного ДТ и 10 % ПМ. В полученную смесь было добавлено 1 г/л углеродных нанотрубок (*TNIMI*) производства компании *Timesnano (Китай)*, с целью улучшения качества распыливания топлива и смесеобразования.

Параметры этих УНТ следующие:

- периферийный диаметр – 5-15 Нм,
- длина – 10-30 мкм;
- поверхность (удельная) – 220-300 м²/г [12].

Для исследования процесса впрыскивания полученного топлива в камеру постоянного объёма был использован CFD-программный комплекс *Converge*.

В данном исследовании был применён метод Эйлера-Лагранжа. Моделирование процесса распада струи состояло из двух этапов: первичный распад – модель *КН-АСТ* с учетом динамической стабильности поверхности струи, турбулизации и кавитации потока на выходе из распылителя [13]; вторичный распад – модель *RT* [14]. Длина распада струи определяла переход от первичной модели ко вторичной. Также она является функцией отношения плотности топлива к плотности воздуха и диаметра распыливающего отверстия. Объединение капель и их столкновение описывается численным методом *No Time Counter* [15]. Для определения скорости испарения топливной капли необходимо вычислить скорость изменения ее радиуса r_d . В этом случае используется метод *Frossling* [16]:

$$dr_d / dt = -\alpha_m \rho_g D B_m Sh_d / (2r_d \rho_l),$$

где t – время; α_m – коэффициент масштабирования для массопереноса; ρ_g и ρ_l – плотность окружающего газа и жидкого топлива; D – коэффициент массопереноса паров топлива в окружающем газе; B_m – число Сполдинга (*Spalding*); Sh_d – число Шервуда (*Sherwood*). Таким образом дифференциальное уравнение температуры капли выглядит как

$$c_{pl}\rho_l\partial T/\partial t = \lambda_l(\partial^2 T/\partial R^2 + \frac{2}{R}\partial T/\partial R),$$

где c_{pl} – теплоемкость жидкого топлива, кДж/(кг·К); λ_l – его теплопроводность, Вт/(м·К); R – радиальное расстояние до центра капли, мкм. В случае, когда лучистый тепловой поток был равен нулю, теплота определялась по формуле:

$$Q_{heat} = \beta_h 2\pi r_d Nu_d \lambda_l (T_g - T_{R=r_d}) + 4\pi r_d^2 \rho_l L dr_d / dt,$$

где β_h – коэффициент масштабирования для теплопередачи; Nu_d – число Нуссельта; T_g – температура окружающего газа, К; L – скрытая теплота испарения топлива, кДж/кг. Значения α_m и β_h для нефтяного ДТ и смеси 90% ДТ и 10% ПМ приняты равным единице, а значения α_m и β_h для смесей этих топлив с УНТ приняты равными 1,081 и 1,159. Данные параметры выбраны из анализа эксперимента по испарению топлива типа *Jet-A* с УНТ [17]. С целью достижения необходимого размера расчётной ячейки (250 мкм) была применена адаптация и метод фиксированной ячейки [18].

Результаты моделирование процесса распыливания смесового биотоплива с добавкой углеродных нанотрубок

В качестве исследуемого объекта выбрана топливная форсунка дизеля Д-243 (4 Ч 11/12,5) (ФДМ-22, распылитель АЗПИ). Расчёт параметров потока в проточной части распылителя и на выходе из распылителя осуществлялся в ПК *Ansys Fluent*. Исследование проводилось на номинальном режиме при $p_{впр\ ср} = 30$ МПа и противодавлении (давлении газов в цилиндре) $p_{ц} = 3,6$ МПа.

Ниже представлены параметры смесового топлива (90% ДТ + 10% ПМ) на выходе из распылителя: массовой расход топлива через одно отверстие – 11,05 и 11,06 г/с; кинетическая энергия турбулентности – 1132 и 1119 м²/с²; скорость диссипации турбулентности – $474,4 \cdot 10^6$ и $459,6 \cdot 10^6$ м²/с³; коэффициент сокращения площади – 0,919 и 0,922. Далее эти данные использованы в качестве граничных условий. При расчетах рассмотрена

только одна из пяти струй распылителя. Значение температура газов в камере постоянного объёма составляло 890 К, что равно температуре в камере сгорания дизеля Д-243 на номинальном режиме.

При добавлении УНТ в жидкие моторные топлива свойства смесей заметно изменяются, что оказывает влияние на процесс распыливания топлива. В частности, от состава указанных смесей зависят значения длин (глубин) проникновения жидкой и паровой фазы струи топлива в КПО (рис. 1). В сравнении с дизельным топливом при впрыскивании биотоплива (смеси ДТ и ПМ) струя жидкого топлива удлиняется. Дальнобойность струи увеличивается вследствие большей плотности БТ. Что касается дробления капель, то данному эффекту препятствуют увеличенные значения вязкости и поверхностного натяжения. Таким образом крупные капли перемещаются на большее расстояние [5, 19]. Кроме того, указанная смесь имеет худшую испаряемость по сравнению с ДТ, что приводит к большему количеству жидкого топлива в струе. В результате через 1,5 мс после впрыскивания длина проникновения жидкой фазы струи ДТ составила 75,37 мм, а соответствующая длина для БТ – 77,10 мм (на 2,29% больше). Глубина прикосновения паров смеси БТ в КПО больше, чем длина прикосновения паров ДТ (87,80 мм против 88,68 мм для ДТ – на 1,0% больше). Это обусловлено более длинной струей смесевоего биотоплива. Если к данному биотопливу (смесь ДТ и ПМ) добавить углеродные нанотрубки, то повышаются значения вязкости, коэффициента теплопроводности и коэффициента диффузии смесей. Как было сказано выше увеличение вязкости топлива замедляет процесс дробления струи. В свою очередь, это приводит к образованию капель большего диаметра и увеличению длины струи [5, 19]. С другой стороны, увеличение диффузии и теплопроводности увеличивает теплообмен. Выравнивание температуры в капле происходит быстрее. Ускоряется переход из жидкой фазы в газообразную, а, следовательно, уменьшается длина струи. Повышенная испаряемость БТ с

добавлением УНТ повышение вязкости оказывает меньшее влияние на длину струи, чем повышение испаряемости (рис. 1). Из рисунка видно, что такое влияние незначительно.

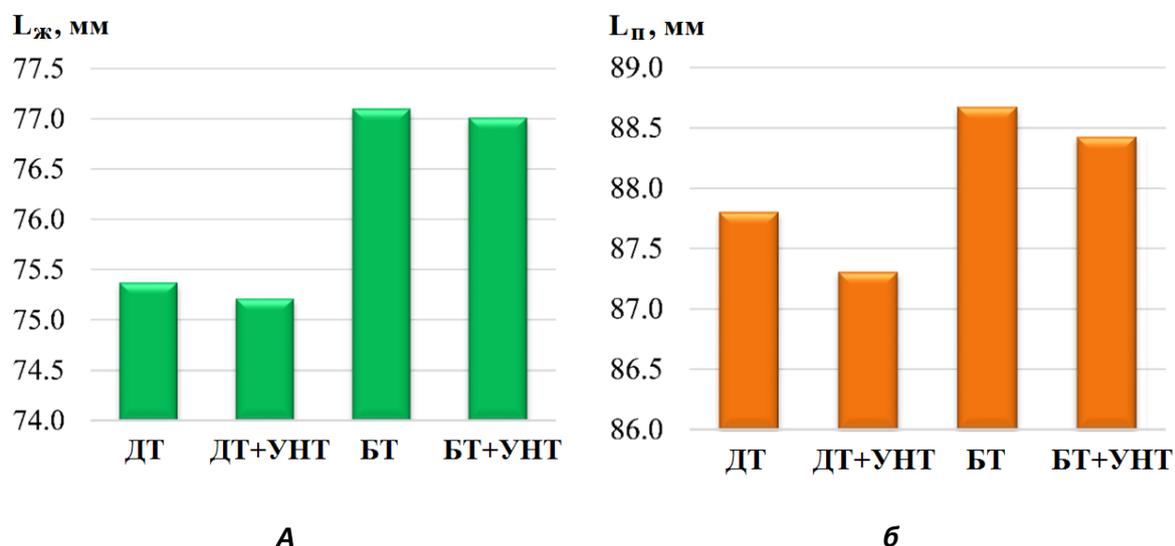


Рис. 1. Длина проникновения жидкой фазы струи $L_{жк}$ (а) и глубина проникновения паров топлива L_n (б) в момент времени 1,5 мс после начала впрыска для нефтяного дизельного топлива (ДТ), смесового биотоплива (БТ) и их смесей с УНТ – соответственно ДТ+УНТ и БТ+УНТ

Угол раскрытия жидкой струи остаётся практически неизменным при использовании БТ (смесь ДТ и ПМ) (рис. 2). Это подтверждают данные по углу раскрытия конуса струи γ через 1,5 мс после впрыскивания этого биотоплива КПО. Данный эффект объясняется противоположным влиянием двух факторов. В смеси содержится ПМ с повышенной вязкостью, которая препятствует дроблению струи и уменьшает угол раскрытия γ . Исследования влияния ПМ на угол γ при низких температурах и отсутствии испарения было проведено ранее в работах [19, 20, 21]. С другой стороны, при высокой температуре (учитывается испаряемость) повышенное давление насыщенных паров дизельного топлива в сравнении БТ интенсифицирует процесс испаряемости капель. Наибольшее влияние наблюдается на периферии топливной струи, где капли имеют меньший размер относительно ядра струи.

Это способствует переходу топлива из жидкой фазы в паровую, а следовательно, уменьшению угла γ . Совместное влияние этих двух факторов приводит к тому, что угол раскрытия жидкой струи γ при распыливании смесового биотоплива (ДТ+ПМ) и чистого ДТ практически одинаков.

Поскольку УНТ значительно влияют на испаряемость топлива, то в БТ с добавлением углеродных нанотрубок угол γ уменьшается. Например, через 1,5 мс после впрыскивания для БТ с УНТ этот угол уменьшается от 9,92 до 9,34° по сравнению со смесевым биотопливом без УНТ (рис. 2).

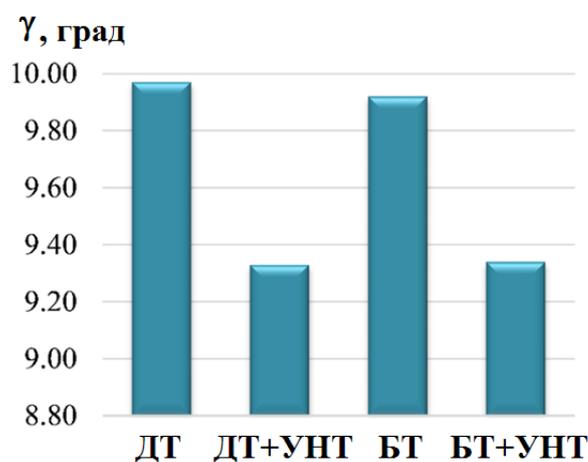


Рис. 2. Угол раскрытия конуса струи топлива γ в момент времени 1,5 мс после начала впрыска (обозначения топлив см. на рис. 1)

Указанное выше изменение свойств ДТ при добавлении в него растительного масла и УНТ влияет на процесс дробления капель. На рисунке 3,а представлены значения средних диаметров капель по Заутеру d_{32} . В БТ (смесь ДТ и ПМ) происходит увеличение d_{32} от 18,6 до 20,5 мкм из-за повышенной вязкости смеси, поверхностного натяжения и пониженного давления насыщенных паров. Добавление УНТ в вышеуказанную смесь способствует увеличению капель d_{32} . Распределение массы капель по их диаметру для исследуемых топлив через 1,5 мс после впрыскивания представлено на рис. 3, б. Здесь функция распределения диаметра $f(d)$ описывается формулой:

$$f(d) = P(d) / d,$$

где $P(d)$ – масса капель, диаметр которых меньше d . Данные рис. 3, б, показывают, что при больших диаметрах капель (больше 30 мкм) наличие УНТ в топливе не влияет на значения F_m , но уменьшает эти значения при маленьких диаметрах капель. Таким образом добавление углеродных нанотрубок приводит к сокращению числа капель малого диаметра. Такие капли быстрее переходят в паровую фазу, это обусловлено увеличением скорости испарения. Анализ проведённых исследований доказывает, что при диаметре капли более 30 мкм их масса у БТ будет значительно больше, чем аналогичные у ДТ.

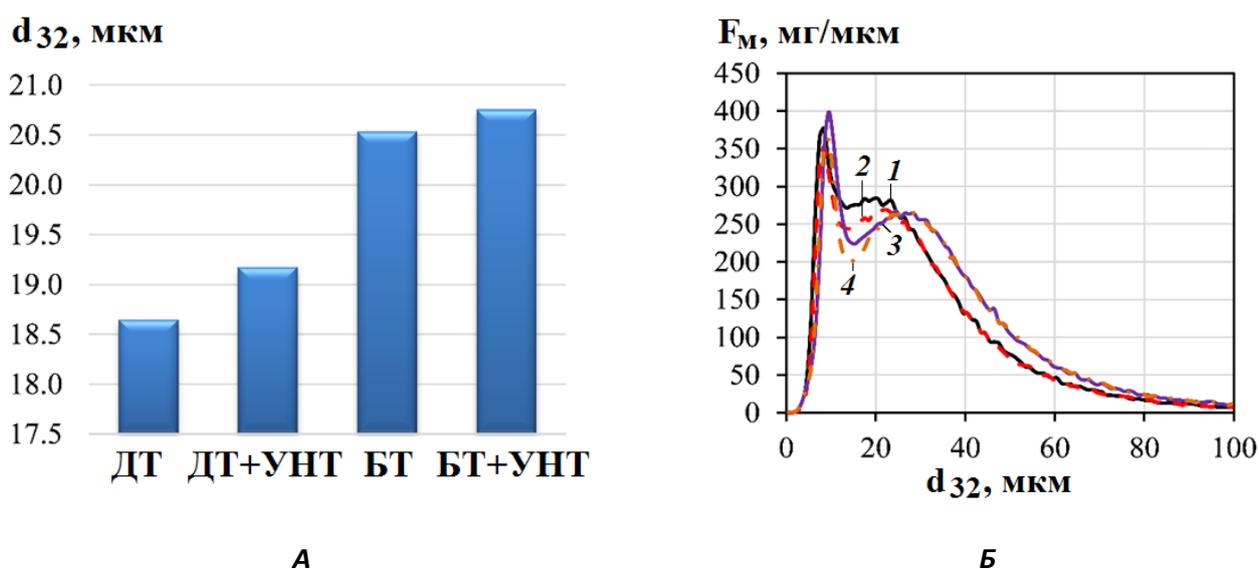


Рис. 3. Средний диаметр капель топлива по Заутеру d_{32} (а) и распределение массы капель по их диаметрам – функция распределения F_m (б) в момент времени 1,5 мс после начала впрыска топлив: 1 – ДТ; 2 – ДТ+УНТ; 3 – БТ; 4 – БТ+УНТ

На рисунке 4 показаны также значения общей массы паров через 1,5 мс после впрыскивания. Пониженное давление насыщенных паров в БТ (смесь ДТ+ПМ) влияет на скорость испарения топлива. Скорость уменьшается, так же как и общая масса паров топливной смеси. При добавлении углеродных нанотрубок к данному смесевому топливу скорость испарения капель

увеличивается, что, в свою очередь, повышает массу паров топлива и обеспечивает улучшение процесса смесеобразования.

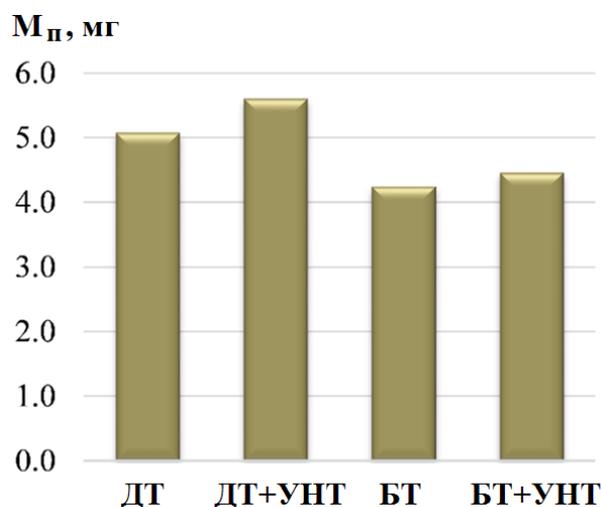


Рис. 4. Общая масса паров топлива M_n в камере постоянного объема для исследуемых топлив в момент времени 1,5 мс после начала впрыска

Можно сделать вывод, что при добавлении 10% подсолнечного масла, в дизельное топливо ухудшает испарение, качество распыливания и смесеобразования полученного смесового топлива. Но этот негативный фактор можно скомпенсировать при добавлении УНТ в рассматриваемые топлива.

Заключение

1. Проведены расчетные исследования распыливания топлива дизеля, работающего на нефтяном ДТ и БТ (смеси 90% ДТ и 10% ПМ) с добавкой УНТ в жидкое топливо количестве 1000 мг/л с использованием ПК *Converge CFD*.

2. На выходе из распыливающего отверстия форсунки потоки нефтяного ДТ и БТ имели следующие значения: массовой расход топлива через одно отверстие – 11,05 и 11,06 г/с; кинетическая энергия турбулентности – 1132 и 1119 м²/с²; скорость диссипации турбулентности – $474,4 \cdot 10^6$ и $459,6 \cdot 10^6$ м²/с³.

3. Добавка УНТ в жидкое топливо ускоряет процессы тепло- и массообмена, способствует повышению реакционной активности топлива, что позволяет улучшать качество процессов распыливания топлива и смесеобразования.

4. Показано, что при добавлении УНТ в БТ положительными эффектами являются меньшая длина струй топлива в КС и лучшая испаряемость топлива, что обеспечивает лучшее качество процесса смесеобразования.

Список источников

1. Гайворонский, А.И. Проблемы и перспективы использования безуглеродных и низкоуглеродных моторных топлив в условиях различных сценариев перехода к углеродно-нейтральной энергетике / А.И. Гайворонский, В.М. Гордин, В.А. Марков // Двигателестроение. – 2022. – № 2. – С. 4-28.
2. Шатров, М.Г. Совершенствование рабочих процессов автотракторных дизелей и их топливных систем, работающих на альтернативных топливах / М.Г. Шатров, А.С. Хачиян, Л.Н. Голубков [и др.]. – М.: МАДИ, 2012. – 220 с.
3. Iakovenko A.L., Dunin A.Y., Dushkin P.V., Savastenko E.A., Shatrov M.G. Research of the influence of alternative fuels on diesel engine noise level // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019. Bristol, 2020. С. 012004.
4. Пискунов, И.В. Альтернативные виды топлив для устойчивого развития транспортного сектора. Часть 3. Биотопливо / И.В. Пискунов, М.А. Ершов, О.Ф. Глаголева // Транспорт на альтернативном топливе. – 2021. – № 6. – С. 39-46.
5. Моторные топлива, производимые из растительных масел / В.А. Марков [и др.]; Под ред. В.А. Маркова. – Рига: Изд-во Lambert Academic Publishing, 2019. – 420 с.
6. Ощепков, П.П. Исследование процесса самовоспламенения биодизельного топлива / П.П. Ощепков, С.В. Смирнов, И.А. Заев // Двигателестроение. – 2020. – № 1. – С. 47-51.
7. Марков, В.А. Использование подсолнечного масла в качестве топлива для дизелей / В.А. Марков, С.Н. Девянин, А.Ю. Шустер // Грузовик. – 2009. – № 4. – С. 46-56.
8. Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания / В.А. Марков [и др.]. – М.: НИЦ «Инженер» (Союз НИО), 2016. – 292 с.
9. Che Mat, S. Performance and Emissions of Straight Vegetable Oils and its Blends as a Fuel in Diesel Engine: A Review / S. Che Mat [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 82. – P. 808-823.

10. Марков, В.А. Совершенствование процессов распыливания топлива и смесеобразования при работе дизеля на смесевых биотопливах / В.А. Марков [и др.] // Двигателестроение. – 2021. – № 1. – С. 3-12.
11. Плотников, С.А. Расчет характеристик впрыскивания при работе дизеля на активированном топливе / С.А. Плотников, П.Я. Кантор, М.В. Мотовилова // Двигателестроение. – 2020. – № 2. – С. 19-23.
12. Са, Бовэнь. Улучшение эксплуатационно-технических показателей дизеля совершенствованием процесса топливоподачи и свойств топлива: дис. ... канд. тех. наук / Бовэнь Са. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 139 с.
13. Som, S. Effects of Primary Breakup Modeling on Spray and Combustion Characteristics of Compression Ignition Engines / S. Som, S.K. Aggarwal // Combustion Flame. – 2010. – Vol. 157. – P. 1179-1193.
14. Liu, A.B. Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays / A.B. Liu, D. Mather, R.D. Reitz // SAE Technical Paper Series. – 1993. – № 930072. – P. 1-13.
15. Schmidt, D.P. A New Droplet Collision Algorithm / D.P. Schmidt, C.J. Rutland // Journal Computation Physics. – 2000. – Vol.164. – P. 62-80.
16. Amsden, A.A. KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays / A.A. Amsted, P.J. O'Rourke, T.D. Butler. – 1989. – 70 p.
17. Aboalhamayie, A. Evaporation Rate of Colloidal Droplets of Jet Fuel and Carbon-Based Nanoparticles: Effect of Thermal Conductivity / A. Aboalhamayie, L. Festa, M. Grimari // Nanomaterials. – 2019. – Vol. 1297. – № 9. – P. 1-10.
18. Senecal, P.K. Grid-Convergent Spray Models for Internal Combustion Engine Computational Fluid Dynamics Simulations / P.K. Senecal [et al.] // Journal Energy Resources Technology. – 2014. – Vol. 136. – Art. no 012204. – P. 1-11.
19. Chen, P.C. Spray and Atomization of Diesel Fuel and its Alternatives from a Single-Hole Injector Using a Common Rail Fuel Injection System / P.C. Chen [et al.] // Fuel. – 2013. – Vol. 103. – P. 850-861.
20. Ishak, M.H.H. Numerical Analysis of Nozzle Flow and Spray Characteristics from Different Nozzles Using Diesel and Biofuel Blends / M.H.H. Ishak [et al.] // Energies. – 2019. – Vol. 281. – № 12. – P. 1-25.
21. Yu, W. Macroscopic Spray Characteristics of Kerosene and Diesel Based on Two Different Piezoelectric and Solenoid Injectors / W. Yu [et al.] // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2016. – Vol.76. – P.12-23.

References

1. Gayvoronskiy A.I., Gordin M.V., Markov V.A. *Dvigatelistroyeniye*, 2022, no 2, pp. 4-28.
2. Shatrov M.G., Khachiyan A.S., Golubkov L.N., Dunin A.Yu. *Sovershenstvovanie rabochnih protsessov avtotraktornyh dizelej i ih toplivnyh sistem, rabotajuschih na al'ternativnyh toplivah* (Improving the Working Processes of Automotive Diesel Engines and Their Fuel Systems Running on Alternative Fuels), Moscow, MADI Publishing, 2012, 220 p.

3. Iakovenko A.L., Dunin A.Y., Dushkin P.V., Savastenko E.A., Shatrov M.G. Research of the influence of alternative fuels on diesel engine noise level // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019. Bristol, 2020. С. 012004.
4. Piskunov I.V., Ershov M.A., Glagoleva O.F. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2021, no 6, pp. 39-46.
5. Markov V.A., Devyanin S.N., Semenov V.G., Bagrov V.V., Zykov S.A. Edited by V.A. Markov. *Motornye topliva, proizvodimye iz rastitel'nyh masel* (Motor Fuels Produced from Vegetable Oils), Riga, Lambert Academic Publishing, 2019, 420 p.
6. Oshchepkov P.P., Smirnov S.V., Zaev I.A. *Dvigatellestrojenije*, 2020, no 1, p. 47-51.
7. Markov V.A., Devyanin S.N., Shuster A.Yu. *Gruzovik*, 2009, no 4, p. 46-56.
8. Markov V.A., Devyanin S.N., Zykov S.A., Gaidar S.M. *Biotopliva dlja dvigatelej vnutrennego sgoraniya* (Biofuels for Internal Combustion Engines), – Moscow, «Ingenger» Publishing, 2016, 292 p.
9. Che Mat S., Idroas M.Y., Hamid M.F. et al. Performance and Emissions of Straight Vegetable Oils and its Blends as a Fuel in Diesel Engine: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82, pp. 808-823.
10. Markov V.A., Kuleshov A.S., Neverov V.A., Sa Bowen, Zenkin A.N. *Dvigatellestrojenije*, 2021, no 1, pp. 3-12.
11. Plotnikov S.A., Kantor P.Ya., Motovilova M.V. *Dvigatellestrojenije*, 2020, no 2, pp. 19-23.
12. Sa Bowen. *Uluchshenie `ekspluatatsionno-tehnicheskikh pokazatelej dizelja sovershenstvovaniem protsessa toplivopodachi i svojstv topliva* (Improving the Operational and Technical Performance of Diesel Engine by Improving the Fuel Supply Process and Fuel Properties), PhD thesis, Moscow, BMSTU, 2021, 139 p.
13. Som S., Aggarwal S.K. Effects of Primary Breakup Modeling on Spray and Combustion Characteristics of Compression Ignition Engines, *Combustion Flame*, 2010, vol. 157, pp. 1179-1193.
14. Liu A.B., Mather D., Reitz R.D. Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays, *SAE Technical Paper Series*, 1993, no 930072, pp. 1-13.
15. Schmidt D.P., Rutland C.J. A New Droplet Collision Algorithm, *Journal Computation Physics*, 2000, vol.164, pp. 62-80.
16. Amsden A.A., O'Rourke P.J., Butler T.D. KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays, 1989, 70 p.
17. Aboalhamayie A., Festa L., Ghamari M. Evaporation Rate of Colloidal Droplets of Jet Fuel and Carbon-Based Nanoparticles: Effect of Thermal Conductivity, *Nanomaterials*, 2019, vol. 1297, no 9, pp. 1-10.
18. Senecal P.K., Pomraning E., Richards K.J. et al. Grid-Convergent Spray Models for Internal Combustion Engine Computational Fluid Dynamics Simulations, *Journal Energy Resources Technology*, 2014, vol. 136, art. no 012204, pp. 1-11.

19. Chen P.C., Wang W.C., Roberts W.L. et al. Spray and Atomization of Diesel Fuel and its Alternatives from a Single-Hole Injector Using a Common Rail Fuel Injection System, *Fuel*, 2013, vol. 103, pp. 850-861.
20. Ishak M.H.H., Ismail F., Mat S.C. et al. Numerical Analysis of Nozzle Flow and Spray Characteristics from Different Nozzles Using Diesel and Biofuel Blends, *Energies*. 2019, vol. 281, no 12, pp. 1-25.
21. Yu W., Yang W., Tay K. et al. Macroscopic Spray Characteristics of Kerosene and Diesel Based on Two Different Piezoelectric and Solenoid Injectors, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, vol.76, pp.12-23.

Статья опубликована по итогам международной научно-технической конференции «10-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса».

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

Информация об авторах

Са Бовэнь, канд. техн. наук, зав.отделом, Cera Turbo (Beijing) Sci & Tech Co., Ltd, КНР.

Марков Владимир Анатольевич, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Девянин Сергей Николаевич, д-р техн. наук, проф., РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева.

Неверов Всеволод Анатольевич, ассистент, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Карпец Федор Сергеевич, аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Слепцов Олег Николаевич, инженер, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Information about the authors

Sa Bowen, Ph.D., head of division, Cera Turbo (Beijing) Sci & Tech Co., Ltd, China.

Markov Vladimir A., Dr. Sc., professor, BMSTU.

Devyanin Sergey N., Dr. Sc., professor, FSBEI HE RT SAU.

Neverov Vsevolod A., teaching assistant, BMSTU.

Karpets Fyodor S., postgraduate, BMSTU.

Sleptsov Oleg N., engineer, BMSTU.

Статья поступила в редакцию 28.02.2023; одобрена после рецензирования 03.03.2023; принята к публикации 23.03.2023.

The article was submitted 28.02.2023; approved after reviewing 03.03.2023; accepted for publication 23.03.2023.