

Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 621.436

doi: 10.18698/0536-1044-2021-9-48-64

Исследование свойств смесей дизельного топлива с углеродными нанотрубками и характеристик его распыливания

Бовэнь Са¹, В.А. Марков¹, Ин Лю¹, В.Г. Камалтдинов², Вэньпей Цяо¹¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана² Южно-Уральский государственный университет

Investigation of Properties of Diesel Fuel and Carbon Nanotubes Mixture and Characteristics of its Atomization

Bowen Sa¹, V.A. Markov¹, Ying Liu¹, V.G. Kamaltdinov², Wenpei Qiao¹¹ Bauman Moscow State Technical University² South Ural State University

Показатели топливной экономичности и токсичности отработавших газов дизельных двигателей можно улучшить путем добавления углеродных нанотрубок в нефтяное дизельное топливо. Углеродные нанотрубки, применяемые в качестве перспективной наноразмерной присадки к дизельному топливу, обладают высокой теплопроводностью и большим отношением площади поверхности к объему. Теплофизические свойства указанных топлив зависят от состава смесей. Проанализированы теплофизические свойства углеродных нанотрубок и их смесей с дизельным топливом. Добавление углеродных нанотрубок в дизельное топливо оказывает незначительное влияние на его динамическую вязкость и теплопроводность. С использованием численных моделей смоделирован процесс распыливания и испарения дизельного топлива с различным содержанием углеродных нанотрубок в камере сгорания постоянного объема. Точность вычислений подтверждена хорошим совпадением расчетных данных с экспериментальными. Моделирование распыливания смесей показало, что длина струи линейно зависит от содержания углеродных нанотрубок в дизельном топливе. Увеличение содержания углеродных нанотрубок в смеси приводит к уменьшению среднего диаметра капель по Заутеру и угла раскрытия конуса струи. Наличие углеродных нанотрубок в дизельном топливе несущественно влияет на содержание в нем паров топлива.

Ключевые слова: дизельное топливо, углеродные нанотрубки, теплофизические свойства, распыливание смесей с испарением

The fuel economy and exhaust emissions of diesel engines can be improved by adding carbon nanotubes to petroleum diesel fuel. Carbon nanotubes, used as a promising nanoscale additive for diesel fuel, have high thermal conductivity and a large surface area to volume

ratio. The thermophysical properties of these fuels, which depend on the composition of the mixtures, are analyzed in this study. Findings of research show that carbon nanotubes added to diesel fuel have little effect on its dynamic viscosity and thermal conductivity. By means of numerical models, we simulated the process of atomization and evaporation of diesel fuel with the different carbon nanotubes content in a constant volume combustion chamber. The accuracy of the calculations is confirmed by the good agreement between the calculated and experimental data. Simulation of mixture atomization showed that the jet length linearly depends on the carbon nanotubes content in diesel fuel. The more carbon nanotubes are in the mixture, the smaller the droplet Sauter mean diameter and the angle of the jet cone opening are. The presence of carbon nanotubes in diesel fuel insignificantly affects the fuel vapor content in it.

Keywords: diesel fuel, carbon nanotubes, thermal-physical properties, atomization of mixtures with evaporation

Наноструктуры получают все большее распространение в энергетических системах. Их применяют в качестве интенсификатора тепловых процессов и катализаторов химических реакций. Это обусловлено уникальными свойствами наноструктур: высоким коэффициентом диффузии, большим отношением поверхности к объему, высокой реактивностью и др. [1].

По сравнению с металлическими и органическими наночастицами углеродные нанотрубки (УНТ) характеризуются очень высокой теплопроводностью [2]. Так, измеренный в работе [3] коэффициент теплопроводности многостенной УНТ составляет около 3000 Вт/(м·К) при температуре 320 К. Этот же параметр для одностенной нанотрубки, приведенный в статье [4], превышает 2000 Вт/(м·К) при температуре 300 К.

Вместе с тем побочные продукты химических реакций, в которых присутствуют нанотрубки, рассматриваются как опасные вещества, которые выделяются в атмосферу и оказывают негативное воздействие на экосистему [5]. Влияние введения УНТ в дизельное топливо (ДТ) или биодизельное топливо на показатели и токсичность отработавших газов (ОГ) дизельных двигателей (далее дизели) подтверждено во многих исследованиях.

В работе [6] рассмотрен одноцилиндровый дизель, работающий на разных видах топлива с добавкой УНТ. Экспериментальные испытания проводили на ДТ и водно-эмульгированном ДТ, куда добавляли УНТ в массовых долях 25 и 50 ppm. По мере увеличения доли добавки УНТ сокращался период задержки воспламенения во всех исследованных режимах работы дизеля. При этом наличие УНТ в ДТ не повышало уровень шума дизеля.

В статье [7] экспериментально исследовано влияние добавления УНТ в топливо на процесс

горения. УНТ в количестве 50 мг/л добавляли к нефтяному ДТ, топливам H20D (20 % н-гептанол + 80 % ДТ) и H40D (40 % н-гептанол + 60 % ДТ). Добавление УНТ в базовое нефтяное топливо сократило период задержки воспламенения и увеличило максимальное давление сгорания. Авторы статьи объяснили причину такого воздействия присадки большим отношением площади поверхности к объему и высокой теплопроводностью УНТ, что позволяет улучшить испарение топлива, его смешение с воздухом и процесс горения.

В работе [8] диспергировали 20, 60 и 100 ppm УНТ в биодизельную смесь (2 % биодизеля из отработанного растительного масла + 98 % ДТ), после чего оценивали эксплуатационные характеристики одноцилиндрового дизеля без наддува в режимах с полной нагрузкой и частотой вращения 1700 и 2300 мин⁻¹. С увеличением содержания УНТ в смеси мощность, крутящий момент и удельный расход топлива дизеля монотонно уменьшались, а коэффициент полезного действия монотонно увеличивался.

В работе [9] исследовано биодизельное топливо, полученное из масла семян дерева Ним (Neem Oil), в которое добавляли УНТ в массовых долях 50 и 100 ppm. Проведен анализ влияния добавки УНТ на выбросы одноцилиндрового дизеля в режиме с полной нагрузкой и частотой вращения 1500 мин⁻¹. Увеличение содержания УНТ приводило к снижению выбросов оксидов азота NO_x, несгоревших углеводородов CH_x и монооксида углерода CO на 9,2, 7,2 и 7,9 % соответственно.

Уменьшение выбросов NO_x и CO при добавлении УНТ в топливо отмечено в статье [10], где исследован одноцилиндровый дизель с воздушным охлаждением в режиме полной нагрузки.

УНТ с периферийным диаметром 20 нм диспергировали в топливо В20 (20 % метиловый эфир масла дерева Ятрофа (*Jatropha*) + 80 % ДТ) в количестве 25, 50 и 100 ppm [10].

Авторы работы [11] изучали влияние добавления УНТ в нефтяное ДТ на токсичность ОГ дизеля 4С11/12,5. Установлено, что в режиме с максимальной нагрузкой и частотой вращения 1500 мин⁻¹ добавление УНТ в ДТ в количестве 500 мг/л приводит к снижению выбросов оксидов азота на 5,3 % и дымности ОГ на 57 % при максимальной нагрузке дизеля. Такое снижение выбросов объясняется тем, что добавление УНТ улучшает качество смесеобразования и ускоряет процесс горения вследствие облегчения распада топливной струи, уменьшения диаметра капель, ускорения их нагрева и испарения.

Влияние добавления УНТ в топливо на показатели токсичности ОГ исследовано в работах [12–14]. В каждой из них отмечено, что присутствие УНТ в жидком топливе улучшает процесс распыливания и смесеобразования. Однако в этих исследованиях дан лишь качественный анализ рабочих процессов дизелей, что требует дальнейшего изучения процессов впрыска, распыливания, испарения топлива и его смешивания с воздухом.

Некоторые публикации посвящены изучению испарения отдельных капель смесей с добавкой УНТ. В работе [15] измеряли скорость испарения капель смесей, полученных диспергированием УНТ диаметром 20 и 50 нм в *n*-тетрадекан (С14) при массовой доле частиц 50, 100 и 150 мг/л. Показано, что наличие УНТ в С14 сокращает процесс его испарения, причем по мере увеличения в нем концентрации УНТ и снижения их диаметра средняя скорость испарения повышается. Средняя скорость испарения С14 с добавкой 150 мг/л УНТ диаметром 20 нм заметно больше скорости испарения чистого С14.

Интенсификация испарения биодизельного топлива, полученного из масла семян дерева Ним (*Neem Oil*), при наличии в нем УНТ в количестве 25, 50 и 100 мг/л подтверждена в работе [16]. Повышение концентрации УНТ в топливе сокращает время, необходимое для его полного испарения. Однако требуется дополнительное изучение процессов распыливания топлив с добавками УНТ и их испарения.

Цель работы — численное исследование влияния УНТ на характеристики распыливания ДТ и его испарения.

Результаты работы [11] показали, что существует потенциал дальнейшего увеличения содержания УНТ в ДТ с точки зрения снижения дымности ОГ. Таким образом, в этом исследовании содержание УНТ в ДТ повысилось до 1000 мг/л.

С помощью теоретических моделей рассчитаны теплофизические свойства смесей ДТ с УНТ. Моделирование распыливания проведено в цилиндрической камере сгорания постоянного объема (КСПО), оборудованной форсункой А20677 с одним распыливающим отверстием.

Свойства топлива и численные модели. *Свойства исследуемых топлив.* В качестве испытуемого наноматериала выбраны УНТ марки XFM04 (фирмы XFNANO, КНР), которые имеют следующие параметры: средний внешний диаметр — 10 нм, средняя длина — 2 мкм, среднее число стенок — 4. Эти УНТ диспергированы в нефтяное ДТ марки Л по ГОСТ 305–2013 с концентрациями 250, 500 и 1000 мг/л для получения смесевых топлив ДТ250УНТ, ДТ500УНТ и ДТ1000УНТ соответственно.

Плотность исследуемых топлив. Плотность рассматриваемых смесей нефтяного ДТ с УНТ — нанотоплива (НТ) — описывается классической формулой, разработанной для традиционной смесевой системы частицы — жидкость с предположением, что УНТ хорошо диспергированы в базовой жидкости [17]:

$$\rho_{\text{НТ}} = \rho_{\text{ДТ}}(1 - \varphi) + \rho_{\text{УНТ}}\varphi, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{НТ}}$, $\rho_{\text{ДТ}}$ и $\rho_{\text{УНТ}}$ — плотность НТ, ДТ и УНТ соответственно; φ — объемная концентрация УНТ в нанотопливе, %.

Формула (1) получена из условия, что ДТ не попадает внутрь УНТ (поперечный размер молекул ДТ позволяет им находиться внутри трубки диаметром 10 нм).

С учетом сжимаемости плотность ДТ определена из выражения [18]

$$[\rho_{\text{ДТ}}(T, p)/\rho_{\text{ДТ}}(T)]^\chi = (B + p)/B;$$

$$\chi = 7,49 + 0,0086(T - 293);$$

$$B = 222,3 - 1,26(T - 293) + 0,62(\rho_{293} - 825), \text{ МПа},$$

где $\rho_{\text{ДТ}}(T, p)$ — плотность ДТ при температуре T (К) и давлении p (МПа); $\rho_{\text{ДТ}}(T)$ — плотность ДТ при температуре T (К) и давлении 0,10325 МПа; ρ_{293} — плотность ДТ при температуре 293 К и давлении 0,10325 МПа.

Для исследуемого ДТ марки Л [19]

$$\rho_{\text{ДТ}}(T) = -0,365T + 936,945.$$

Плотность УНТ рассчитывалась как функция от их внутреннего, внешнего диаметров и числа стенок УНТ. При этом учитывалось, что каждый слой УНТ представляет собой свернутую графеновую плоскость без шва, а расстояние между соседними атомами одинаково и равно 0,1421 нм (все слои УНТ расположены концентрически с межслойным расстоянием 0,3400 нм) [20]. Расчетная плотность УНТ марки XFM04 составила 1091 кг/м³.

На основе этого подхода определена плотность смесей ДТ с УНТ при разной температуре. При температуре 300 К и давлении 0,10325 МПа плотности ДТ и ДТ1000УНТ составили 827,4 и 827,7 кг/м³, а при давлении 150 МПа — 893,3 и 893,5 кг/м³ соответственно. Так как разница между плотностями УНТ марки XFM04 и ДТ невелика, а количество добавки УНТ в ДТ мало, изменение плотности при добавлении УНТ в ДТ не учитывалось.

Динамическая вязкость исследуемых топлив. Моторное топливо может представлять собой ньютоновскую или неньютоновскую жидкость в зависимости от его реологических свойств. Исследование свойств смесей ДТ и УНТ [1], показало, что такое топливо является ньютоновской жидкостью при массовой концентрации УНТ в смеси менее 0,5 %.

Относительная динамическая вязкость (отношение динамических вязкостей смеси и ДТ) такой ньютоновской жидкости определяется как функция объемной концентрации УНТ с помощью феноменологических и гидродинамических уравнений [21]. При нормальных условиях относительная динамическая вязкость смеси ДТ и УНТ имеет вид

$$\mu_{\text{НТ}}/\mu_{\text{ДТ}} = 1 + 250\phi, \tag{2}$$

где $\mu_{\text{НТ}}$ и $\mu_{\text{ДТ}}$ — динамическая вязкость НТ и ДТ.

Экспериментальные зависимости относительной динамической вязкости НТ от объемной концентрации УНТ в смеси ϕ при температуре 15 °С, построенные по данным зарубежных исследователей для топлив D2S5W + УНТ [6], JBD + УНТ [13], B20 + УНТ [14] и JB20D + УНТ [22], приведены на рис. 1. Видно, что увеличение содержания УНТ в смеси с ДТ от 0 до 1000 мг/л приводит к росту вязкости

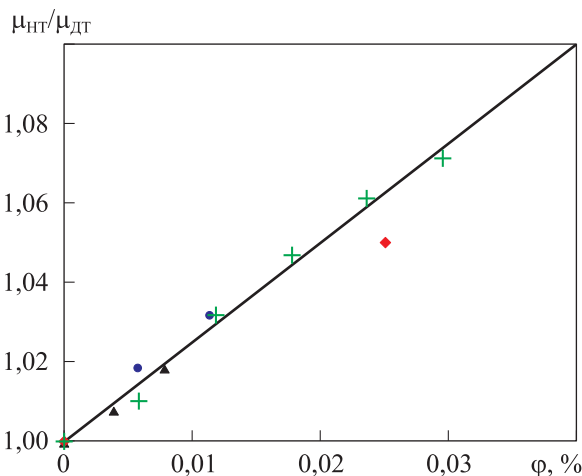


Рис. 1. Экспериментальная (точки) и расчетная (линия) зависимости относительной динамической вязкости $\mu_{\text{НТ}}/\mu_{\text{ДТ}}$ от объемной концентрации УНТ в смеси ϕ при температуре 15 °С:
● — D2S5W + УНТ; ▲ — JBD + УНТ; ◆ — B20 + УНТ; + — JB20D + УНТ

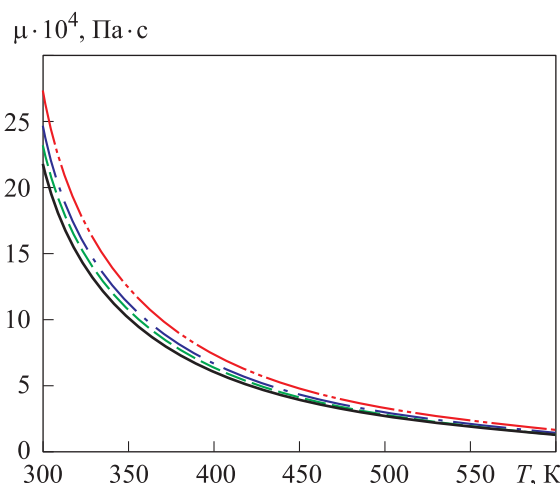


Рис. 2. Расчетная зависимость динамической вязкости μ ДТ (—), ДТ250УНТ (---), ДТ500УНТ (-.-) и ДТ1000УНТ (-.-.-) от температуры T

примерно на 20 %. Там же показана зависимость $\mu_{\text{НТ}}/\mu_{\text{ДТ}} = f(\phi)$, полученная путем расчета по формуле (2).

Сравнение экспериментальных (точки) и расчетных (линия) данных показывает, что зависимость относительной динамической вязкости смеси от объемной концентрации УНТ в пределах рассматриваемого диапазона изменения ϕ можно считать линейной. Формула (2) хорошо описывает относительную динамическую вязкость смесей ДТ и УНТ. При этом динамическая вязкость ДТ марки Л определяется следующей логарифмической зависимостью [19]:

$$\ln(\mu_{\text{ДТ}}/\rho_{\text{ДТ}}) = 5,7066 - 11,3262/(T - 273,15) - 0,0163T. \quad (3)$$

Результаты расчета динамической вязкости смесей ДТ с УНТ показывают, что добавление УНТ в ДТ приводит к увеличению динамической вязкости смеси, причем с повышением температуры разница вязкостей ДТ и смеси уменьшается (рис. 2).

Удельная теплоемкость исследуемых топлив. Удельная теплоемкость исследуемых смесей определена в предположении равномерного распределения температуры между ДТ и УНТ [23]:

$$c_{p \text{ НТ}} = \frac{(1 - \varphi)\rho_{\text{ДТ}}c_{p \text{ ДТ}} + \varphi\rho_{\text{УНТ}}c_{p \text{ УНТ}}}{\rho_{\text{НТ}}}, \quad (4)$$

где $c_{p \text{ НТ}}$, $c_{p \text{ ДТ}}$ и $c_{p \text{ УНТ}}$ — удельная изобарная теплоемкость НТ, ДТ и УНТ соответственно.

Удельная изобарная теплоемкость ДТ марки Л при температуре T рассчитана по выражению [24]

$$c_{p \text{ ДТ}} = 509,565 + 4,9T, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \quad (5)$$

На основании данных работы [25] с помощью метода наименьших квадратов получена следующая зависимость изобарной удельной теплоемкости УНТ, Дж/(моль · К), от температуры:

$$c_{p \text{ УНТ}} = \begin{cases} 5,45953 \cdot 10^{-7} T^3 & \text{при } 0 \text{ К} \leq T < 150 \text{ К;} \\ -1,58718 + 0,022865T & \text{при } 150 \text{ К} \leq T < 600 \text{ К;} \\ -3,85643 + 0,65272T^{0,5} & \text{при } T \geq 600 \text{ К.} \end{cases} \quad (6)$$

В работе [25] с использованием методов молекулярной структурной механики рассчитана удельная теплоемкость разных УНТ. Установлено, что изменение внешнего диаметра УНТ и числа их стенок оказывает слабое влияние на удельную теплоемкость.

При температуре 200 и 500 К удельная теплоемкость не зависит от длины УНТ. При температуре 1000 К по мере роста длины УНТ до 9 нм удельная теплоемкость повышается, оставаясь практически неизменной при дальнейшем увеличении длины УНТ.

Данные об удельной теплоемкости УНТ, указанные в работе [25], использованы для определения зависимостей удельных теплоемкостей УНТ и смесей ДТ с УНТ от температуры. По формулам (4)–(6) рассчитана удельная теп-

лоемкость смесей ДТ с УНТ. Вследствие малой концентрации УНТ в ДТ увеличение объемной концентрации УНТ в смеси φ приводит к незначительному уменьшению ее теплоемкости. Добавление 1000 мг УНТ к одному литру ДТ при $T = 300 \text{ К}$ приводит к снижению удельной теплоемкости с 2212,36 до 2210,22 Дж/(кг · К) или на 0,097 %, а при $T = 500 \text{ К}$ — с 2713,58 до 2711,29 Дж/(кг · К), т. е. на 0,080 %.

Теплопроводность исследуемых топлив. Для описания теплопроводности смесей ДТ с УНТ использована модель [26], разработанная на основе приближения Максвелла — Гарнетта и учитывающая термическое сопротивление поверхности раздела фаз:

$$\lambda_{\text{НТ}}/\lambda_{\text{ДТ}} = [3 + \varphi(\beta_{11} + \beta_{33})]/(3 - \varphi\beta_{11}); \quad (7)$$

$$\beta_{11} = 2(\lambda_{11}^c - \lambda_{\text{ДТ}})/(\lambda_{11}^c + \lambda_{\text{ДТ}}); \quad (8)$$

$$\beta_{33} = \lambda_{33}^c/\lambda_{\text{ДТ}} - 1,$$

где $\lambda_{\text{НТ}}$ и $\lambda_{\text{ДТ}}$ — коэффициент теплопроводности НТ и ДТ соответственно; λ_{11}^c и λ_{33}^c — эквивалентная теплопроводность одной УНТ с окружающей ее жидкостью по поперечному направлению и продольной оси УНТ соответственно.

В случае сверхтонкого межфазного теплового барьерного слоя для смесей ДТ и УНТ эквивалентные теплопроводности одной УНТ с окружающей ее жидкостью по поперечному направлению и продольной оси УНТ определены в виде [27]

$$\lambda_{11}^c = \lambda_{\text{УНТ}}/[1 + 2a_K\lambda_{\text{УНТ}}/(D_{\text{УНТ}}\lambda_{\text{ДТ}})]; \quad (9)$$

$$\lambda_{33}^c = \lambda_{\text{УНТ}}/[1 + 2a_K\lambda_{\text{УНТ}}/(L_{\text{УНТ}}\lambda_{\text{ДТ}})],$$

где $\lambda_{\text{УНТ}}$ — коэффициент теплопроводности УНТ; a_K — диаметр Капицы, являющийся произведением теплового сопротивления Капицы R_K и теплопроводности ДТ $\lambda_{\text{ДТ}}$, т. е. $a_K = R_K\lambda_{\text{ДТ}}$, $R_K = 3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; $D_{\text{УНТ}}$ — внешний диаметр УНТ; $L_{\text{УНТ}}$ — длина УНТ.

Коэффициент теплопроводности ДТ марки Л рассчитан по формуле [24]

$$\lambda_{\text{ДТ}} = 0,14668 - 0,000105T, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}). \quad (10)$$

Теплопроводность УНТ зависит от температуры, хиральности УНТ, их диаметра, длины, количества стенок и дефектов [28]. В работе [3] проведены измерения теплопроводности одиночной многостенной УНТ с внешним диамет-

ром 14 нм и длиной 2,5 мкм при разной температуре.

В статье [29] с помощью метода обратной неравновесной молекулярной динамики смоделирована теплопроводность одностенной УНТ различной длины при температуре 300 К. Показано, что с ростом длины УНТ от 5 до 350 нм теплопроводность увеличивается при соблюдении следующего правила: коэффициент теплопроводности α изменяется от 0,54 (100 нм < $L_{УНТ}$ < 350 нм) до 0,77 кВт/(м · К) ($L_{УНТ}$ < 25 нм). Причина такого явления — переменное соотношение между средним свободным пробегом фононов и длиной УНТ [30].

Сделано предположение, что теплопроводность остается постоянной, если длина трубки намного больше длины среднего свободного пробега энергоносящих фононов (предельное значение $L_{УНТ} = 500$ нм). Установлено, что средняя длина УНТ марки XFM04 составляет 2 мкм (в работе [3] — 2,5 мкм), а их средний диаметр равен 10 нм (в работе [3] — 14 нм).

Отмечено, что для описания зависимости коэффициента теплопроводности от температуры исследуемых смесей ДТ с УНТ целесообразно использовать данные по теплопроводности УНТ, указанные в работе [3]. На основании данных этой работы с помощью метода наименьших квадратов получена следующая зависимость коэффициента теплопроводности УНТ, Вт/(м · К), от температуры:

$$\lambda_{УНТ}(T) = \begin{cases} 0,008344T^{2,5} & \text{при } 8 \text{ К} < T \leq 50 \text{ К;} \\ 0,059T^2 & \text{при } 50 \text{ К} < T \leq 150 \text{ К;} \\ -0,0528T^2 + 32,53T - 2365 & \text{при } T > 150 \text{ К.} \end{cases} \quad (11)$$

С помощью формул (7)–(11) найдена на зависимость коэффициента теплопроводности смесей ДТ с УНТ от температуры (рис. 3). При температуре 300 К коэффициенты теплопроводности УНТ марки XFM04 и ДТ марки Л составляют 2643 и 0,1152 Вт/(м · К), а коэффициенты теплопроводности топлив ДТ250УНТ, ДТ500УНТ и ДТ1000УНТ — 0,1171, 0,1202 и 0,1252 Вт/(м · К) соответственно. Таким образом, УНТ, добавленное в ДТ, оказывает значительное влияние на теплопроводность топлива. При добавлении 1000 мг УНТ на один литр ДТ теплопроводность смесей увеличивается примерно на 9 %.

Численные модели распыливания. Для исследования влияния добавки УНТ на развитие

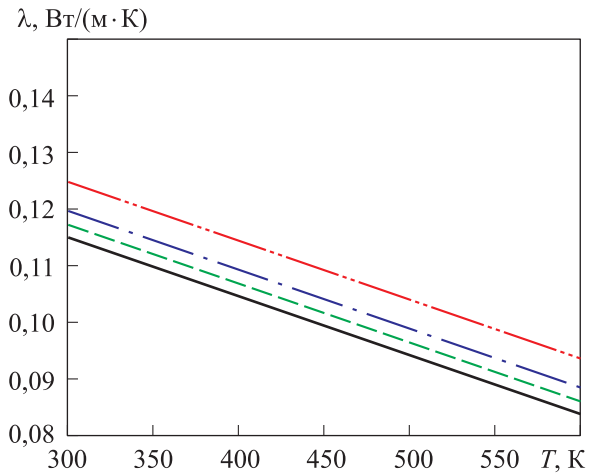


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности λ ДТ (—), ДТ250УНТ (---), ДТ500УНТ (-·-) и ДТ1000УНТ (-·-·-) от температуры T

струи ДТ проведено моделирование распыливания смеси ДТ с УНТ в КСПО с помощью программы Converge CFD. КСПО цилиндрической формы диаметром 100 мм и длиной 108 мм заполнена азотом с температурой 900 К и давлением 6 МПа.

Характеристики впрыска, формируемые дизельной форсункой А210677 с одним распыливающим отверстием [31], заданы при давлении впрыска 150 МПа и его продолжительности 1,5 мс [32].

Параметры дизельной форсунки А210677

Выходной диаметр отверстия, мм	0,0837
К-фактор	1,8
Максимальный подъем иглы, мкм	466
Радиус скругления фаски на входе в отверстие, мкм	20
Направление отверстия	Осевое

При моделировании процесса распыливания смесей с испарением применен подход Эйлера — Лагранжа. Базовый размер сетки для КСПО принят равным 2 мкм. Использован адаптивный выбор размеров элементов сетки с тремя уровнями масштабирования для полей скоростей и температур с минимальным размером сетки (0,25 мкм).

Моделирование распада струи проведено с помощью гибридной модели KH-RT [33]. Столкновение и объединение капель описано численной схемой No Time Counter [34]. Для моделирования испарения капель применены корреляционный метод изменения радиуса капель Фрослинга и модель кипения капель [35].

Скорость изменения радиуса капли r_d вследствие испарения рассчитана по формуле

$$dr_d/dt = -\alpha_m \rho_r DB_m Sh_d / (2r_d \rho_j),$$

где t — время; α_m — коэффициент масштабирования для массопереноса; ρ_r и ρ_j — плотность окружающего газа и жидкого топлива; D — коэффициент массопереноса паров топлива в окружающем газе; B_m — число Сполдинга; Sh_d — число Шервуда.

Температура внутри капли описывается дифференциальным уравнением

$$c_{p,j} \rho_j \partial T / \partial t = \lambda_j \left(\partial^2 T / \partial R^2 + \frac{2}{R} \partial T / \partial R \right),$$

где $c_{p,j}$ — удельная теплоемкость жидкого топлива, кДж/(кг·К); λ_j — теплопроводность жидкого топлива, Вт/(м·°С); R — радиальное расстояние до центра капли, мкм.

При отсутствии лучистого теплообмена теплота, поступающая в каплю, определяется выражением

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

где β_h — коэффициент масштабирования для теплопередачи; Nu_d — число Нуссельта; T_r — температура окружающего газа, К; $T_{R=r_d}$ — температура на поверхности капли; L — скрытая теплота испарения топлива, кДж/кг.

Для проверки модели распыливания использованы экспериментальные (измеренные) длины (глубины) проникновения струй жидкого топлива L_j и его паров L_n в окружающий газ, которые моделировались распыливанием н-додекана

[36, 37]. Сравнение расчетных и экспериментальных данных (рис. 4, а, б) показало, что используемые численные модели хорошо описывают процесс распыливания и испарения н-додекана.

Чтобы учесть влияние диффузионного эффекта, эффекта броуновского движения УНТ и воспроизведения процесса испарения капель ДТ с УНТ, предложены полиномы для коэффициентов масштабирования α_m и β_h как функций концентрации УНТ в ДТ. При этом использованы экспериментальные данные об испарении отдельных капель топлива Jet-A с УНТ, приведенные в работе [38], где определена динамика изменения диаметра неподвижной капли в потоке горячего азота с температурой 393 К и скоростью 3,98 м/с.

В результате получены следующие полиномы:

$$\alpha_{m \text{ УНТ}} / \alpha_{m \text{ ДТ}} = -0,5984 f_{\text{УНТ}}^2 + 1,4023 f_{\text{УНТ}} + 1;$$

$$\beta_{h \text{ УНТ}} / \beta_{h \text{ ДТ}} = -0,3465 f_{\text{УНТ}}^2 + 0,8002 f_{\text{УНТ}} + 1,$$

где $\alpha_{m \text{ УНТ}}$ и $\beta_{h \text{ УНТ}}$ — коэффициенты масштабирования для смесей ДТ с УНТ; $f_{\text{УНТ}}$ — концентрация УНТ, мас. %; $\alpha_{m \text{ ДТ}}$ и $\beta_{h \text{ ДТ}}$ — коэффициенты масштабирования для ДТ.

На рис. 5, а и б приведены результаты сравнения экспериментальных данных, взятых из работы [38], и расчета нормированного диаметра капель D^2/D_0^2 (D — мгновенный диаметр капли, D_0 — начальный диаметр капли) ДТ и смеси ДТ с 0,5 % УНТ, а также средней скорости испарения капли ДТ с различной концентрацией УНТ. Сделан вывод о хорошем

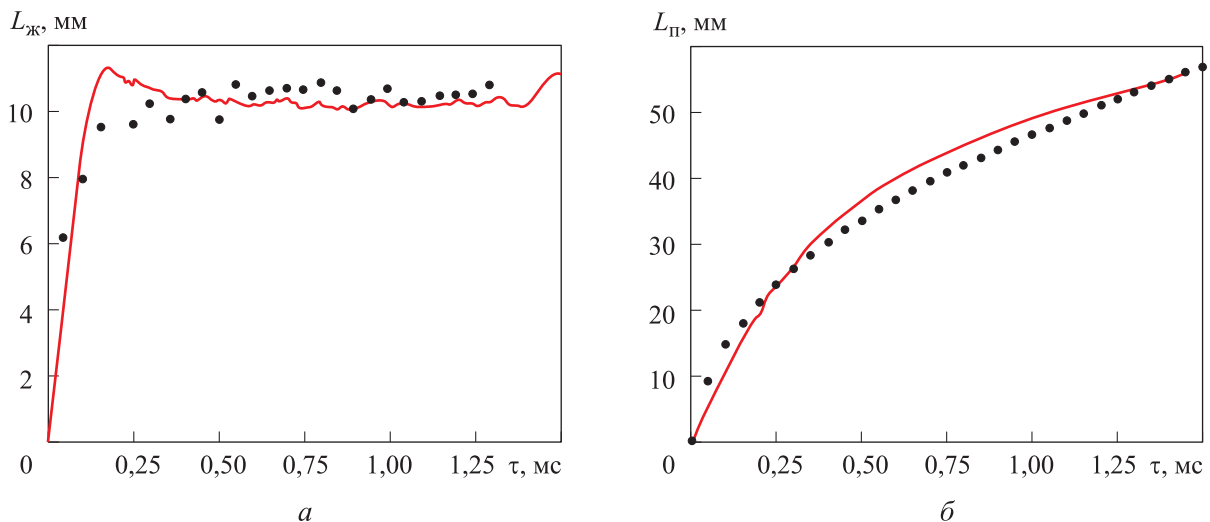


Рис. 4. Расчетные (—) и экспериментальные (•) зависимости глубин проникновения струй жидкого топлива L_j (а) и его паров L_n (б) в окружающий газ от времени после начала впрыска τ при распыливании н-додекана

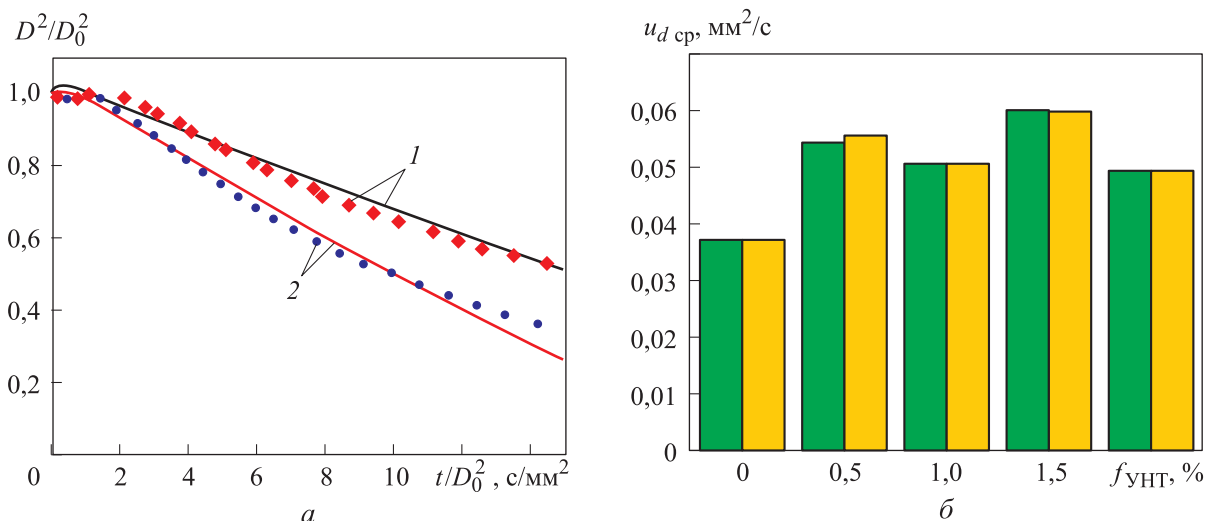


Рис. 5. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных параметров капель: а — расчетная (линии) и экспериментальная (точки) зависимости нормированного диаметра капель D^2/D_0^2 ДТ (1) и смеси ДТ с 0,5 % УНТ (2) от характерного времени испарения t/D_0^2 ; б — расчетная (■) и экспериментальная (■) зависимости средней скорости испарения капли $u_{d,ср}$ смесей ДТ с УНТ от концентрации УНТ $f_{УНТ}$

совпадении расчетных и экспериментальных данных, а модифицированная модель испарения с полиномами для α_m и β_h хорошо описывает испарение капель смесей ДТ с УНТ.

Анализ результатов сравнения расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о возможности использования этих численных моделей для прогнозирования теплофизических свойств топлива при моделировании распыливания смесей ДТ с УНТ.

Результаты и их обсуждение. С использованием описанных моделей проведено моделирование процесса распыливания смесей ДТ с УНТ с испарением в следующих типичных для современных дизелей условиях: давление впрыска — 150 МПа; температура топлива на выходе из форсунки — 363 К; давление в КСПО — 6 МПа; температура инертного азота в КСПО — 900 К, продолжительность впрыска — 1,5 мс.

Результаты расчета параметров струй исследуемых топлив приведены на рис. 6. На начальной стадии впрыска (до 0,1 мс после начала впрыска) при малом подъеме иглы нет существенной разницы в глубине проникновения жидких струй в окружающий газ $L_{ж}$ для различных видов топлива.

Через 0,25...1,40 мс после начала впрыска этот параметр колеблется в ограниченном узком диапазоне. Это свидетельствует о том, что струя на выходе из распыливающего отверстия форсунки находится в стабильной стадии. Наличие УНТ в ДТ приводит к уменьшению

глубины проникновения струи жидкого топлива в окружающий газ $L_{ж}$ (рис. 6, а), а ее осредненное значение $L_{ж,ср}$ за этот период линейно зависит от содержания УНТ в ДТ (рис. 6, б).

Полученные значения диаметра капель по Заутеру d_{32} для исследуемых топлив и их осредненное значение в период времени 0,25...1,40 мс свидетельствуют о том, что смешивание ДТ с УНТ позволяет снизить мелкость распыливания (уменьшить d_{32}) по мере роста содержания УНТ в ДТ. Увеличение содержания УНТ в ДТ с 0 до 1000 мг/л снижает средний диаметр капель по Заутеру на 10 %.

При этом отмечено уменьшение угла раскрытия конуса струи. Как показано на рис. 7, а при стабилизированном развитии распыливания через 0,8 мс после начала впрыска угол раскрытия конуса струи для ДТ составляет 14,17°, а для ДТ1000УНТ — 13,31°. Это объясняется тем, что добавление УНТ в ДТ оказывает существенное влияние на вязкость и теплопроводность топлива и незначительное — на его плотность и теплоемкость.

Как следует из данных рис. 7, б, при впрыскивании жидкого топлива в окружающий газ расстояние от оси струи до ее периферии увеличивается от нуля на выходе из распыливающего отверстия до 0,5...0,6 мм при осевом расстоянии от выхода распыливающего отверстия до центра поперечного сечения струи более 4 мм.

Известны факторы, влияющие на качество распыливания жидкого топлива, основными из

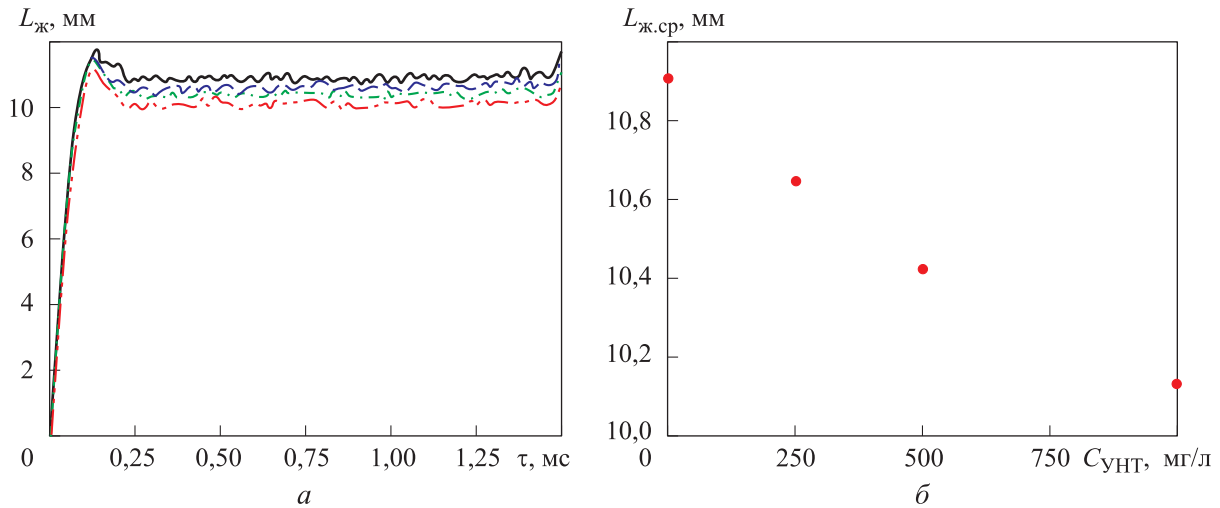


Рис. 6. Результаты расчета параметров струй исследуемых топлив:
 а — зависимость текущей глубины проникновения струи жидкого топлива в окружающий газ $L_{ж}$ от времени после начала впрыска τ ДТ (—), ДТ250УНТ (---), ДТ500УНТ (-.-) и ДТ1000УНТ (....);
 б — зависимость осредненной глубины проникновения струи жидкого топлива в окружающий газ $L_{ж,ср}$ от содержания УНТ в ДТ $C_{УНТ}$ через 0,4...1,2 мс после начала впрыска

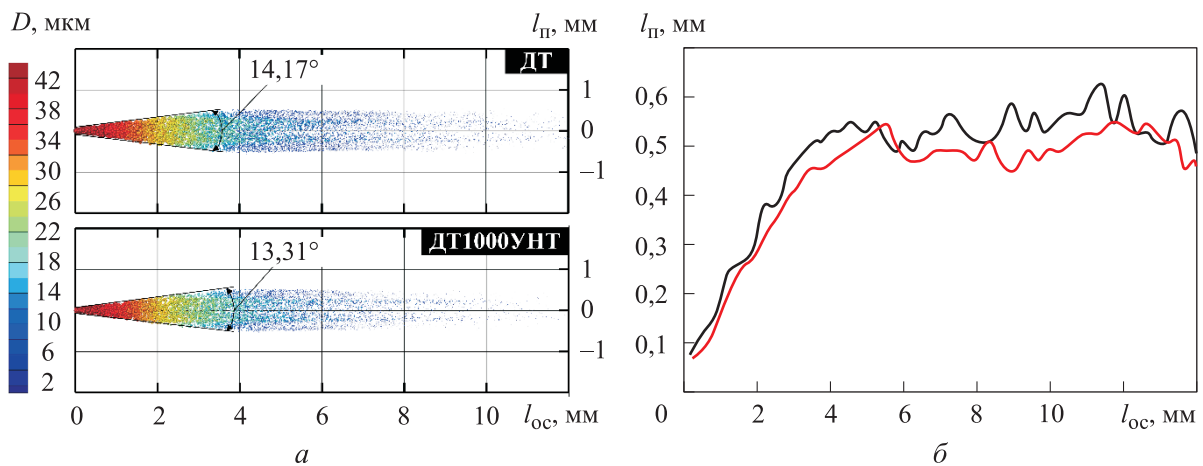


Рис. 7. Результаты исследования угла раскрытия конуса струи жидкого топлива через 0,8 мс после начала впрыска топлива:
 а — дисперсность распыливания капель в струе топлива; б — зависимость расстояния от оси струи жидкого топлива до ее периферии $l_{п}$ от осевого расстояния от выхода распыливающего отверстия до центра поперечного сечения струи $l_{ос}$ для ДТ (—) и ДТ1000УНТ (—)

которых являются его плотность и вязкость [39]. Их повышение приводит к увеличению глубины проникновения струи в окружающий газ, уменьшению угла конуса ее раскрытия и диаметра капель распыливаемого топлива. Эти особенности отмечены во многих экспериментальных и численных исследованиях распыливания нефтяного ДТ и биодизельного топлива [40–42].

Повышенная вязкость ДТ с УНТ препятствует распаду капель топлива и вызывает возрастание их диаметра. Повышенная плотность нефтяного ДТ с добавками УНТ увеличивает отношение плотности капель топлива к плот-

ности окружающего газа, что также задерживает их распад. В то же время на испарение капель оказывает влияние теплопроводность топлива, которая характеризует скорость теплопередачи внутри капель, обусловленную градиентом температуры.

Более высокая теплопроводность смесей ДТ с УНТ увеличивает скорость подвода теплоты к капле топлива из окружающей высокотемпературной среды, что повышает скорость испарения топлива с поверхности капель и уменьшает их диаметр. Пониженная удельная теплоемкость смесей ДТ с УНТ ускоряет рост температуры внутри капель и процесс испарения топлива.

Расчет испарения отдельных капель ДТ и смесей ДТ с УНТ в неподвижном газообразном азоте с температурой 900 К и давлением 6 МПа (рис. 8, 9) показал, что добавление УНТ в ДТ увеличивает скорость испарения капли и сокращает время ее существования в интервалах скорости $u_d = 50 \dots 300$ м/с и начальной температуры $T_{d0} = 363 \dots 500$ К, которые соответствуют диапазонам скоростей и температур

капель топлива в исследуемом режиме распыливания.

В экспериментальных исследованиях [15, 16, 38] также отмечено повышение скорости испарения жидкого топлива при добавлении УНТ.

После добавления УНТ в ДТ под влиянием перечисленных факторов средний диаметр капель по Заутеру, определенный по всему объему

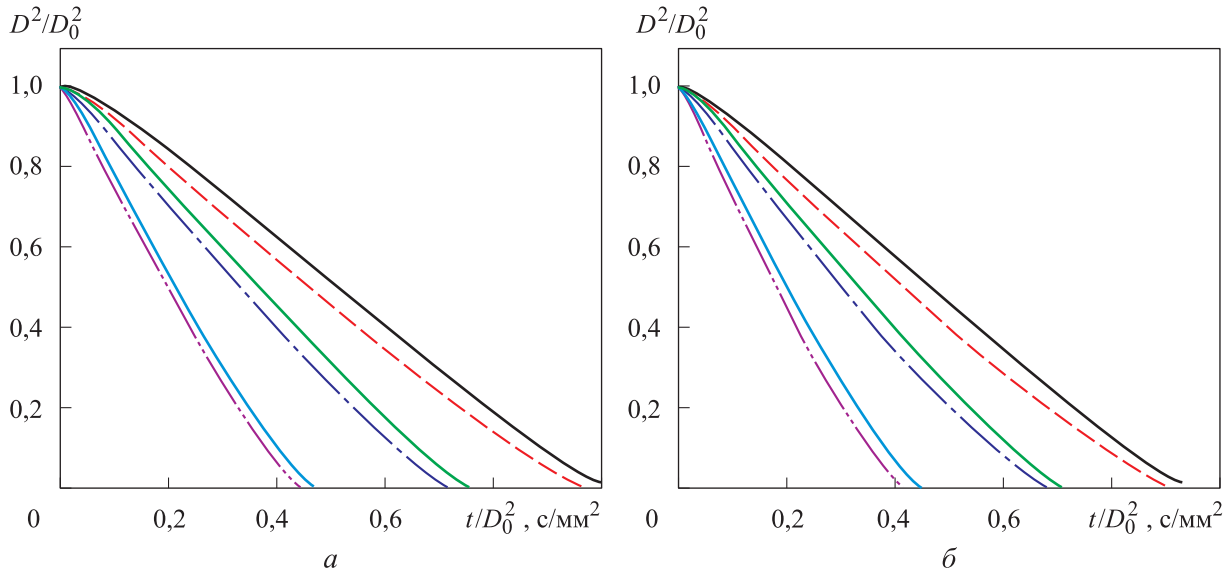


Рис. 8. Динамика изменения нормированного диаметра отдельной капли топлива D^2/D_0^2 при начальной температуре $T_{d0} = 363$ (а) и 500 К (б) и различных значениях скорости капли u_d в среде неподвижного азота с температурой 900 К и давлением 6 МПа:

— и - - - — испарение капель ДТ и ДТ1000УНТ при $u_d = 50$ м/с; — и - · - — испарение капель ДТ и ДТ1000УНТ при $u_d = 100$ м/с; — и · · - — испарение капель ДТ и ДТ1000УНТ при $u_d = 300$ м/с

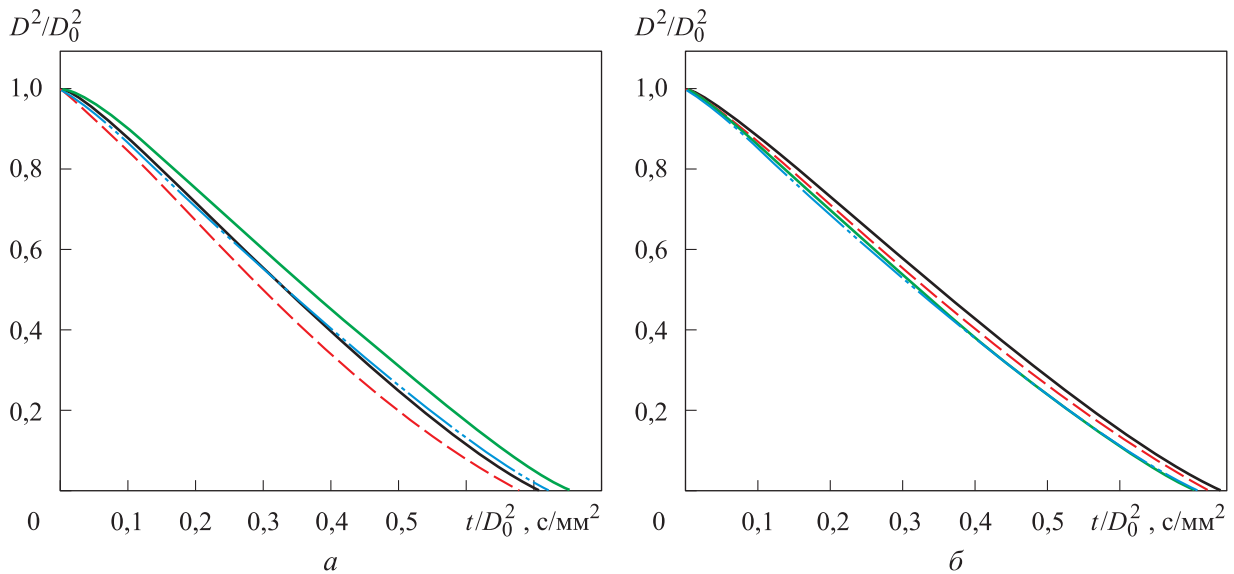


Рис. 9. Динамика изменения нормированного диаметра отдельной капли топлива при скорости капли $u_d = 100$ м/с и различных значениях начальной температуры T_{d0} в среде неподвижного азота с температурой 900 К и давлением 6 МПа:
 а — испарение капель ДТ при $T_{d0} = 363$ (—), 500 К (—) и ДТ1000УНТ при $T_{d0} = 373$ (-·-·-), 500 К (- - -);
 б — испарение капель ДТ (—), ДТ250УНТ (- - -), ДТ500УНТ (- · - ·) и ДТ500УНТ (- · - ·) при $T_{d0} = 400$ К

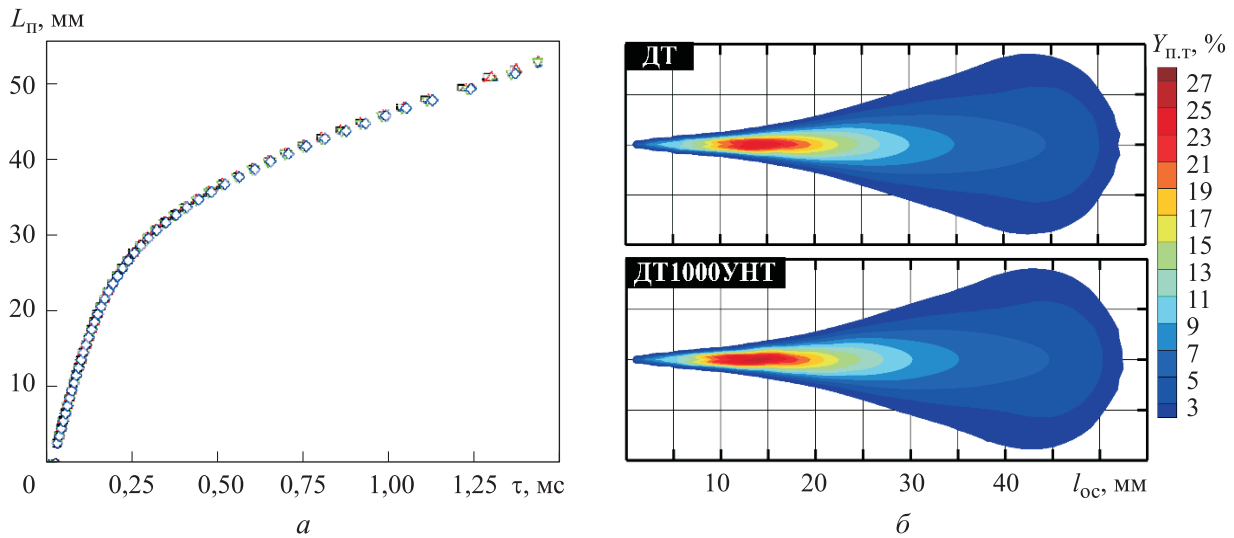


Рис. 10. Результаты исследования параметров паров топлив при их распыливании: а — зависимость текущей глубины проникновения паров $L_{п}$ ДТ (\square), ДТ250УНТ (\triangle), ДТ500УНТ (∇) и ДТ1000УНТ (\diamond) в окружающий газ от времени после начала впрыска τ ; б — распределение массовой концентрации паров $Y_{п.т}$ ДТ и ДТ1000УНТ через 1,5 мс после начала впрыска

струи, уменьшается. Во фронте и на периферии струи с более высокими температурами и большим градиентом концентрации паров топлива усиленное испарение капель смесей ДТ с УНТ приводит к уменьшению глубины проникновения струи жидкого топлива в окружающий газ и угла конуса ее распыливания.

Это согласуется с экспериментальными данными работы [43], в которой исследована смесь ДТ с УНТ в количестве 40 ppm. Отмечено, что добавление УНТ в ДТ приводило к уменьшению угла конуса раскрытия струи, однако его изменение не превышало $0,4^\circ$, что объясняется малым содержанием наночастиц в ДТ.

На рис. 10 приведены текущая глубина проникновения паров исследуемых топлив в окружающий газ $L_{п}$ и сравнение массовой концентрации паров топлива в смеси газов для ДТ и ДТ1000УНТ через 1,5 мс после начала впрыска. Отмечено, что пары топлива образуются не сразу после начала впрыска. В начальной стадии впрыска глубина проникновения паров топлива в окружающий газ растет в линейной зависимости от времени, а затем в нелинейной.

Эти характеристики совпадают с экспериментальными результатами по проникновению паров ДТ в окружающий газ, полученными в работах [40–42]. Так как наибольшее влияние на испарение топлива оказывают свойства ДТ, структуры распределения паров

для ДТ и смесей ДТ с УНТ очень похожи (рис. 10, б).

Выводы

1. Выполнен анализ теплофизических свойств смесей ДТ с УНТ и численное исследование их распыливания и испарения в цилиндрической КСПО.

2. Установлено, что наибольшее влияние добавления УНТ в ДТ оказывает на динамическую вязкость топлива. При нормальных условиях увеличение содержания УНТ в смеси с ДТ от 0 до 1000 мг/л приводит к росту вязкости примерно на 20 %. Теплопроводность топлива также существенно зависит от присутствия УНТ в ДТ. При добавлении 1000 мг УНТ на один литр ДТ теплопроводность смеси увеличивается примерно на 9 %. Менее значительное влияние наличие УНТ в смеси оказывает на плотность топлива и его теплоемкость. При этом плотность топлива растет, а его теплоемкость падает.

3. Выявлено, что добавление УНТ в ДТ вызывает уменьшение глубины проникновения струи топлива в окружающий газ, угла конуса ее раскрытия и среднего диаметра капель по Заутеру. Увеличение содержания УНТ в ДТ с 0 до 1000 мг/л снижает средний диаметр капель по Заутеру на 10 %. На стадии стабильного распыливания глубина проникновения жидкого топлива в окружающий газ линейно зависит от

содержания УНТ в ДТ. С увеличением последнего средний диаметр по Заутеру уменьшается. Присутствие УНТ в ДТ оказывает незначительное влияние на длину проникновения паров топлива в окружающий газ.

4. Предложенные модели могут быть использованы для прогнозирования параметров распыливания других видов жидкого топлива, содержащего УНТ.

Литература

- [1] Naddaf A., Heris S.Z. Density and rheological properties of different nanofluids based on diesel oil at different mass concentrations. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2019, vol. 135, no. 2, pp. 1229–1242, doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7456-8>
- [2] Naddaf A., Heris S.Z. Experimental study on thermal conductivity and electrical conductivity of diesel oil-based nanofluids of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2018, vol. 95, pp. 116–122, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.05.004>
- [3] Kim P., Shi L., Majumdar A., et al. Thermal transport measurements of individual multi-walled nanotubes. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, vol. 87, no. 21, art. 215502, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.215502>
- [4] Yu C., Shi L., Yao Z., et al. Thermal conductance and thermopower of an individual single-wall carbon nanotube. *Nano Lett.*, 2005, vol. 5, no. 9, pp. 1842–1846, doi: <https://doi.org/10.1021/nl051044e>
- [5] Goswami L., Kim K.H., Deep A., et al. Engineered nano particles: nature, behavior, and effect on the environment. *J. Environ. Manage.*, 2017, vol. 196, pp. 297–315, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.011>
- [6] Basha J.S., Anand R.B. An experimental investigation in a diesel engine using carbon nanotubes blended water–diesel emulsion fuel. *P. I. Mech. Eng., A-J. Pow.*, 2011, vol. 225, no. 3, pp. 279–288, doi: <https://doi.org/10.1177/0957580910394247>
- [7] EL-Seesy A.I., Kosaka H., Hassan H., et al. Combustion and emission characteristics of a common rail diesel engine and RCEM fueled by n-heptanol–diesel blends and carbon nanomaterial additives. *Energ. Convers. Manage.*, 2019, vol. 196, pp. 370–394, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.049>
- [8] Heydari-Maleney K., Taghizadeh-Alisarai A., Ghobadian B., et al. Analyzing and evaluation of carbon nanotubes additives to diesel–B2 fuels on performance and emission of diesel engines. *Fuel*, 2017, vol. 196, pp. 110–123, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.091>
- [9] Ramakrishnan G., Krishnan P., Rathinam S., et al. Role of nano-additive blended biodiesel on emission characteristics of the research diesel engine. *Int. J. Green Energy*, 2019, vol. 16, no. 6, pp. 435–441, doi: <https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1577742>
- [10] Gad M.S., Gadow S.I. Enhancement of combustion characteristics and emissions reductions of a diesel engine using biodiesel and carbon nanotube. *Fuller. Nanotub. Carbon Nanostructures*, 2021, vol. 29, no. 4, pp. 267–279, doi: <https://doi.org/10.1080/1536383X.2020.1837779>
- [11] Markov V., Kamaltdinov V., Zherdev A., et al. Study on the possibility of improving the environmental performance of diesel engine using carbon nanotubes as a petroleum diesel fuel additive. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 22, pp. 4345, doi: <https://doi.org/10.3390/en12224345>
- [12] Najafi G. Diesel engine combustion characteristics using nano-particles in biodiesel–diesel blends. *Fuel*, 2018, vol. 212, pp. 668–678, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.001>
- [13] Basha J.S., Anand R.B. The influence of nano additive blended biodiesel fuels on the working characteristics of a diesel engine. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2013, vol. 35, no. 3, pp. 257–264, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-013-0023-0>
- [14] Sunil S., Prasad B.S.C., Kotresh M., et al. Studies on suitability of multiwalled CNT as catalyst in combustion on a CI engine fueled with dairy waste biodiesel. *Mater. Today*, 2020, vol. 26-2, pp. 613–619, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.179>
- [15] Mei D., Sun C., Li L., et al. Evaporation characteristics of fuel sessile droplets with nanoparticles. *Energ. Source., Part A*, 2019, vol. 41, no. 6, pp. 677–688, doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1520350>

- [16] Khond V.W., Kriplani V.M. Experimental investigation and modeling of the evaporation rate of carbon nanotube blended emulsified Neem biodiesel. *Biofuels*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 485–491, doi: <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1323322>
- [17] Mahian O., Kolsi L., Amani M., et al. Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-Part I: Fundamentals and theory. *Phys. Rep.*, 2019, vol. 790, pp. 1–48, doi: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.11.004>
- [18] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. *Системы топливоподачи и управления дизелей*. Москва, Легион-Автодата, 2005. 344 с.
- [19] Марков В.А., Девянин С.Н., Зыков С.А. и др. Вязкостные характеристики многокомпонентных смесевых биотоплив на основе растительных масел. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2016, № 6, с. 33–49.
- [20] Laurent C., Flahaut E., Peigney A. The weight and density of carbon nanotubes versus the number of wall and diameter. *Carbon*, 2010, vol. 48, no. 10, pp. 2994–2996, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.04.010>
- [21] Khanafer K., Vafai K. A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2011, vol. 54, no. 19–20, pp. 4410–4428, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.048>
- [22] El-Seesy A.I., Abdel-Rahman A.K., Bady M., et al. Performance, combustion, and emission characteristics of a diesel engine fueled by biodiesel-diesel mixtures with multi-walled carbon nanotubes additives. *Energy Convers. Manag.*, 2017, vol. 135, pp. 373–393, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.090>
- [23] Pak B.C., Cho Y.I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Exp. Heat Transf.*, 1998, vol. 11, no. 2, pp. 151–170, doi: <https://doi.org/10.1080/08916159808946559>
- [24] Кавтарадзе Р.З. *Теория поршневых двигателей. Специальные главы*. Москва, Машиностроение, 2008. 720 с.
- [25] Li C., Chou T-W. Modeling of heat capacities of multi-walled carbon nanotubes by molecular structural mechanics. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2005, vol. 409, no. 1–2, pp. 140–144, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.07.058>
- [26] Nan C.W., Liu G., Lin Y., et al. Interface effect on thermal conductivity of carbon nanotube composites. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, vol. 85, no. 16, pp. 3549–3551, doi: <https://doi.org/10.1063/1.1808874>
- [27] Nan C.W., Birringer R., Clarke D.R., et al. Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance. *J. Appl. Phys.*, 1997, vol. 81, no. 10, pp. 6692–6699, doi: <https://doi.org/10.1063/1.365209>
- [28] Han Z., Fina A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: a review. *Prog. Polym. Sci.*, 2011, vol. 36, no. 7, pp. 914–944, doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.11.004>
- [29] Alaghemandi M., Algaer E., Böhm M.C., et al. The thermal conductivity and thermal rectification of carbon nanotubes studied using reverse non-equilibrium molecular dynamics simulations. *Nanotechnology*, 2009, vol. 20, no. 11, art. 115704, doi: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/11/115704>
- [30] Chiu H-Y., Deshpande V.V., Postma HWC., et al. Ballistic phonon thermal transport in multiwalled carbon nanotubes. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, vol. 95, no. 22, art. 226101, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.226101>
- [31] Spray a nozzle geometry. *ecn.sandia.gov: веб-сайт*. URL: <https://ecn.sandia.gov/diesel-spray-combustion/target-condition/spray-a-nozzle-geometry/> (дата обращения: 03.03.2021).
- [32] Rate of injection. *cmt.upv.es: веб-сайт*. URL: <https://www.cmt.upv.es/ECN03.aspx/> (дата обращения: 03.03.2021).
- [33] Beale J.C., Reitz R.D. Modeling spray atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor hybrid model. *At. Sprays*, 1999, vol. 9, no. 6, pp. 623–650, doi: <https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.v9.i6.40>
- [34] Schmidt D.P., Rutland C.J. A new droplet collision algorithm. *J. Comput. Phys.*, 2000, vol. 164, no. 1, pp. 62–80, doi: <https://doi.org/10.1006/jcph.2000.6568>

- [35] Amsden A.A. *KIVA-II: a computer program for chemically reactive flows with sprays*. Report of Los Alamos National Laboratory, 1989. 163 p.
- [36] Pickett L.M., Genzale C.L., Manin J. Uncertainty quantification for liquid penetration of evaporating sprays at diesel-like conditions. *At. Sprays*, 2015, vol. 25, no. 5, pp. 425–452, doi: <https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.2015010618>
- [37] Spray a vapor penetration length. *ecn.sandia.gov: веб-сайт*. URL: <https://ecn.sandia.gov/cvdata/assets/datafiles/pen/bkldaAL1-pen.txt> (дата обращения: 03.03.2021).
- [38] 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. 9, no. 9, art. 1297, doi: <https://doi.org/10.3390/nano9091297>
- [39] Chang C.T., Farrell P.V. A study on the effects of fuel viscosity and nozzle geometry on high injection pressure diesel spray characteristics. *SAE Trans.*, 1997, vol. 106, pp. 558–567.
- [40] Dernotte J., Hespel C., Houille S., et al. Influence of fuel properties on the diesel injection process in nonvaporizing conditions. *At. Sprays*, 2012, vol. 22, no. 6, pp. 461–492, doi: <https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.2012004401>
- [41] Wang X., Huang Z., Kuti O.A., et al. Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2010, vol. 31, no. 4, pp. 659–666, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.03.006>
- [42] Kuti O.A., Sarathy S.M., Nishida K. Spray combustion simulation study of waste cooking oil biodiesel and diesel under direct injection diesel engine conditions. *Fuel*, 2020, vol. 267, art. 117240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117240>
- [43] Zhang Z. *Investigation into fuel pre-treatments for combustion improvement on a compression ignition engine*. Newcastle University, 2019. 203 p.

References

- [1] Naddaf A., Heris S.Z. Density and rheological properties of different nanofluids based on diesel oil at different mass concentrations. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2019, vol. 135, no. 2, pp. 1229–1242, doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7456-8>
- [2] Naddaf A., Heris S.Z. Experimental study on thermal conductivity and electrical conductivity of diesel oil-based nanofluids of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2018, vol. 95, pp. 116–122, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.05.004>
- [3] Kim P., Shi L., Majumdar A., et al. Thermal transport measurements of individual multi-walled nanotubes. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, vol. 87, no. 21, art. 215502, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.215502>
- [4] Yu C., Shi L., Yao Z., et al. Thermal conductance and thermopower of an individual single-wall carbon nanotube. *Nano Lett.*, 2005, vol. 5, no. 9, pp. 1842–1846, doi: <https://doi.org/10.1021/nl051044e>
- [5] Goswami L., Kim K.H., Deep A., et al. Engineered nano particles: nature, behavior, and effect on the environment. *J. Environ. Manage.*, 2017, vol. 196, pp. 297–315, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.011>
- [6] Basha J.S., Anand R.B. An experimental investigation in a diesel engine using carbon nanotubes blended water–diesel emulsion fuel. *P. I. Mech. Eng., A-J. Pow.*, 2011, vol. 225, no. 3, pp. 279–288, doi: <https://doi.org/10.1177/0957582410394247>
- [7] EL-Seesy A.I., Kosaka H., Hassan H., et al. Combustion and emission characteristics of a common rail diesel engine and RCEM fueled by n-heptanol-diesel blends and carbon nanomaterial additives. *Energ. Convers. Manage.*, 2019, vol. 196, pp. 370–394, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.049>
- [8] Heydari-Maleney K., Taghizadeh-Alisaraei A., Ghobadian B., et al. Analyzing and evaluation of carbon nanotubes additives to diesel-B2 fuels on performance and emission of diesel engines. *Fuel*, 2017, vol. 196, pp. 110–123, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.091>
- [9] Ramakrishnan G., Krishnan P., Rathinam S., et al. Role of nano-additive blended biodiesel on emission characteristics of the research diesel engine. *Int. J. Green Energy*, 2019, vol. 16, no. 6, pp. 435–441, doi: <https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1577742>

- [10] Gad M.S., Gadow S.I. Enhancement of combustion characteristics and emissions reductions of a diesel engine using biodiesel and carbon nanotube. *Fuller. Nanotub. Carbon Nanostructures*, 2021, vol. 29, no. 4, pp. 267–279, doi: <https://doi.org/10.1080/1536383X.2020.1837779>
- [11] Markov V., Kamaltdinov V., Zherdev A., et al. Study on the possibility of improving the environmental performance of diesel engine using carbon nanotubes as a petroleum diesel fuel additive. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 22, pp. 4345, doi: <https://doi.org/10.3390/en12224345>
- [12] Najafi G. Diesel engine combustion characteristics using nano-particles in biodiesel-diesel blends. *Fuel*, 2018, vol. 212, pp. 668–678, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.001>
- [13] Basha J.S., Anand R.B. The influence of nano additive blended biodiesel fuels on the working characteristics of a diesel engine. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2013, vol. 35, no. 3, pp. 257–264, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-013-0023-0>
- [14] Sunil S., Prasad B.S.C., Kotresh M., et al. Studies on suitability of multiwalled CNT as catalyst in combustion on a CI engine fueled with dairy waste biodiesel blends. *Mater. Today*, 2020, vol. 26-2, pp. 613–619, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.179>
- [15] Mei D., Sun C., Li L., et al. Evaporation characteristics of fuel sessile droplets with nanoparticles. *Energ. Source., Part A*, 2019, vol. 41, no. 6, pp. 677–688, doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1520350>
- [16] Khond V.W., Kriplani V.M. Experimental investigation and modeling of the evaporation rate of carbon nanotube blended emulsified Neem biodiesel. *Biofuels*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 485–491, doi: <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1323322>
- [17] Mahian O., Kolsi L., Amani M., et al. Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-Part I: Fundamentals and theory. *Phys. Rep.*, 2019, vol. 790, pp. 1–48, doi: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.11.004>
- [18] Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Sistemy toplivopodachi i upravleniya dizeley* [Diesel fuel delivery and control systems]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2005. 344 p. (in Russ.).
- [19] Markov V.A., Devyanin S.N., Zykov S.A., et al. Viscosity characteristics of multicomponent mixed biofuels based on vegetable oils. *Transport na al'ternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2016, no. 6, pp. 33–49 (in Russ.).
- [20] Laurent C., Flahaut E., Peigney A. The weight and density of carbon nanotubes versus the number of wall and diameter. *Carbon*, 2010, vol. 48, no. 10, pp. 2994–2996, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.04.010>
- [21] Khanafer K., Vafai K. A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2011, vol. 54, no. 19–20, pp. 4410–4428, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.048>
- [22] El-Seesy A.I., Abdel-Rahman A.K., Bady M., et al. Performance, combustion, and emission characteristics of a diesel engine fueled by biodiesel-diesel mixtures with multi-walled carbon nanotubes additives. *Energy Convers. Manag.*, 2017, vol. 135, pp. 373–393, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.090>
- [23] Pak B.C., Cho Y.I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Exp. Heat Transf.*, 1998, vol. 11, no. 2, pp. 151–170, doi: <https://doi.org/10.1080/08916159808946559>
- [24] Kavtaradze R.Z. *Teoriya porshnevnykh dvigateley. Spetsial'nye glavy* [Theory of piston engines. Special chapters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 720 p.
- [25] Li C., Chou T-W. Modeling of heat capacities of multi-walled carbon nanotubes by molecular structural mechanics. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2005, vol. 409, no. 1–2, pp. 140–144, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.07.058>
- [26] Nan C.W., Liu G., Lin Y., et al. Interface effect on thermal conductivity of carbon nanotube composites. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, vol. 85, no. 16, pp. 3549–3551, doi: <https://doi.org/10.1063/1.1808874>
- [27] Nan C.W., Birringer R., Clarke D.R., et al. Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance. *J. Appl. Phys.*, 1997, vol. 81, no. 10, pp. 6692–6699, doi: <https://doi.org/10.1063/1.365209>

- [28] Han Z., Fina A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: a review. *Prog. Polym. Sci.*, 2011, vol. 36, no. 7, pp. 914–944, doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.11.004>
- [29] Alaghemandi M., Algaer E., Böhm M.C., et al. The thermal conductivity and thermal rectification of carbon nanotubes studied using reverse non-equilibrium molecular dynamics simulations. *Nanotechnology*, 2009, vol. 20, no. 11, art. 115704, doi: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/11/115704>
- [30] Chiu H-Y., Deshpande V.V., Postma HWC., et al. Ballistic phonon thermal transport in multiwalled carbon nanotubes. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, vol. 95, no. 22, art. 226101, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.226101>
- [31] Spray a nozzle geometry. *ecn.sandia.gov: website*. URL: <https://ecn.sandia.gov/diesel-spray-combustion/target-condition/spray-a-nozzle-geometry/> (accessed: 03.03.2021).
- [32] Rate of injection. *cmt.upv.es: website*. URL: <https://www.cmt.upv.es/ECN03.aspx> (accessed: 03.03.2021).
- [33] Beale J.C., Reitz R.D. Modeling spray atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor hybrid model. *At. Sprays*, 1999, vol. 9, no. 6, pp. 623–650, doi: <https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.v9.i6.40>
- [34] Schmidt D.P., Rutland C.J. A new droplet collision algorithm. *J. Comput. Phys.*, 2000, vol. 164, no. 1, pp. 62–80, doi: <https://doi.org/10.1006/jcph.2000.6568>
- [35] Amsden A.A. *KIVA-II: a computer program for chemically reactive flows with sprays*. Report of Los Alamos National Laboratory, 1989. 163 p.
- [36] Pickett L.M., Genzale C.L., Manin J. Uncertainty quantification for liquid penetration of evaporating sprays at diesel-like conditions. *At. Sprays*, 2015, vol. 25, no. 5, pp. 425–452, doi: <https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.2015010618>
- [37] Spray a vapor penetration length. *ecn.sandia.gov: website*. URL: <https://ecn.sandia.gov/cvdata/assets/datafiles/pen/bkldaAL1-pen.txt> (accessed: 03.03.2021).
- [38] 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. 9, no. 9, art. 1297, doi: <https://doi.org/10.3390/nano9091297>
- [39] Chang C.T., Farrell P.V. A study on the effects of fuel viscosity and nozzle geometry on high injection pressure diesel spray characteristics. *SAE Trans.*, 1997, vol. 106, pp. 558–567.
- [40] Dernotte J., Hespel C., Houille S., et al. Influence of fuel properties on the diesel injection process in nonvaporizing conditions. *At. Sprays*, 2012, vol. 22, no. 6, pp. 461–492, doi: <https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.2012004401>
- [41] Wang X., Huang Z., Kuti O.A., et al. Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2010, vol. 31, no. 4, pp. 659–666, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.03.006>
- [42] Kuti O.A., Sarathy S.M., Nishida K. Spray combustion simulation study of waste cooking oil biodiesel and diesel under direct injection diesel engine conditions. *Fuel*, 2020, vol. 267, art. 117240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117240>
- [43] Zhang Z. *Investigation into fuel pre-treatments for combustion improvement on a compression ignition engine*. Newcastle University, 2019. 203 p.

Статья поступила в редакцию 26.03.2021

Информация об авторах

СА Бовэнь — аспирант кафедры «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: bowensa@yandex.ru).

МАРКОВ Владимир Анатольевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru).

ЛЮ Ин — аспирант кафедры «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: Liuying208@yandex.ru).

КАМАЛТДИНОВ Вячеслав Гилимянович — доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания и электронные системы автомобилей». Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (454080, Челябинск, Российская Федерация, проспект Ленина, д. 76, e-mail: vkamaltdinov@yandex.ru).

ЦЯО Вэньпей — аспирант кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: venpei.tsyao@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Са Бовэнь, Марков В.А., Лю Ин, Камалтдинов В.Г., Цяо Вэньпей. Исследование свойств смесей дизельного топлива с углеродными нанотрубками и характеристик его распыливания. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 9, с. 48–64, doi: 10.18698/0536-1044-2021-9-48-64

Please cite this article in English as:

Sa Bowen, Markov V.A., Liu Ying, Kamaltdinov V.G., Qiao Wenpei. Investigation of Properties of Diesel Fuel and Carbon Nanotubes Mixture and Characteristics of its Atomization. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 9, pp. 48–64, doi: 10.18698/0536-1044-2021-9-48-64

Information about the authors

SA Bowen — post-graduate, Department of Piston Engines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: bowensa@yandex.ru).

MARKOV Vladimir Anatolievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department of Piston Engines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru).

LIU Ying — post-graduate, Department of Piston Engines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: Liuying208@yandex.ru).

KAMALTDINOV Vyacheslav Gilimyanovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Internal Combustion Engines and Electronic Systems of Automobiles. South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 76, e-mail: vkamaltdinov@yandex.ru).

QIAO Wenpei — post-graduate, Department of Thermal Physics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: venpei.tsyao@yandex.ru).