

Научная статья
УДК 621.436, 665.11

Расчетные исследования процесса топливоподачи дизельного двигателя при его питании дизельным топливом и биотопливом

Бовэнь Са¹, Владимир Анатольевич Марков², Сергей Николаевич Девянин³,
Андрей Александрович Савастенко⁴, Акбаржон Анварович Нормуродов⁵

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

^{2,5}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

⁴Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

¹bowensa@yandex.ru

²vladimir.markov58@yandex.ru

³devta@rambler.ru

⁴dozentrudn@mail.ru

⁵a_nor7@mail.ru

Аннотация. Одним из современных направлений достижения требуемых показателей токсичности отработавших газов дизельных двигателей является использование смесевых и эмульгированных биотоплив. В статье рассматриваются возможности использования в качестве топлива рапсового масла, а также эмульсии 70% рапсового масла по объему с 30% этанола. Проведены расчетные исследования течения потока этих топлив в распылителе с использованием программного комплекса Ansys Fluent. Моделировалось стационарное течение потока указанных топлив в распылителе дизельной форсунки типа ФДМ-22 производства Ногинского завода топливной аппаратуры с распылителем Алтайского завода прецизионных изделий. Распылитель имел пять распыливающих отверстий диаметром 0,35 мм. При этом давление на входе в расчетную область составляло 51,5 МПа, а противодавления – 0,1 и 8,9 МПа. Отмечено, что эмульгирование рапсового масла этанолом изменяет свойства топлива и режим кавитации в распылителе форсунки, что существенно влияет на параметры потока в распылителе. При обоих рассматриваемых противодавлениях впрыскиванию наибольшую скорость течения топлива на выходе из распыливающего отверстия имеет нефтяное дизельное топливо, среднюю – эмульсия, а наименьшую – рапсовое масло. При противодавлении 0,1 МПа наибольшая кинетическая энергия турбулентности на выходе из распыливающего отверстия отмечена для рапсового масла, средняя – для эмульсии, а наименьшая – для дизельного топлива. При противодавлении 8,9 МПа кинетическая энергия турбулентности у трех рассматриваемых топлив оказалась соизмеримой, но ее наибольшее значение отмечено для рапсового масла.

Ключевые слова: дизельный двигатель, нефтяное дизельное топливо, рапсовое масло, этиловый спирт.

Для цитирования: Са Бовэнь, Марков В.А., Девянин С.Н., Савастенко А.А., Нормуродов А.А. Расчетные исследования процесса топливоподачи дизельного двигателя при его питании дизельным топливом и биотопливом // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №1(35).

Original article

Computational studies of the fuel supply process of a diesel engine when it is powered by diesel fuel and biofuels

**Bowen Sa¹, Vladimir A. Markov², Sergey N. Devyanin³, Andrey A. Savastenko⁴,
Akbarjon A. Normurodov⁵**

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

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

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

⁴Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹bowensa@yandex.ru

²vladimir.markov58@yandex.ru

³devta@rambler.ru

⁴dozentrudn@mail.ru

⁵a_nor7@mail.ru

Abstract. One of the modern directions of achieving the required indicators of toxicity of exhaust gases of diesel engines is the use of mixed and emulsified biofuels. The article discusses the possibility of using rapeseed oil as fuel, as well as an emulsion of 70% rapeseed oil by volume with 30% ethanol. Computational studies of the flow of these fuels in the atomizer using the Ansys Fluent software package have been carried out. The stationary flow of the specified fuels into the sprayer of a diesel nozzle of the FDM-22 type manufactured by the Noginsk Fuel Equipment Plant with a sprayer of the Altai Precision Products Plant was simulated. The sprayer had five spraying holes with a diameter of 0.35 mm. At the same time, the pressure at the entrance to the design area was 51.5 MPa, and the back pressures were 0.1 and 8.9 MPa. It is noted that the emulsification of rapeseed oil with ethanol changes the properties of the fuel and the cavitation mode in the nozzle sprayer, which significantly affects the flow parameters in the sprayer. With both considered injection back pressures, the highest fuel flow velocity at the outlet of the spray hole is petroleum diesel fuel, the average is emulsion, and the lowest is rapeseed oil. With a back pressure of 0.1 MPa, the highest kinetic energy of turbulence at the outlet of the spray hole is noted for rapeseed oil, the average is for the emulsion, and the lowest is for diesel fuel. At a back pressure of 8.9 MPa, the kinetic energy of turbulence in the three fuels under consideration turned out to be commensurate, but its greatest value was noted for rapeseed oil.

Keywords: diesel engine, petroleum diesel fuel, rapeseed oil, ethyl alcohol.

For citation: Sa Bowen, Markov V.A., Devyanin S.N., Savastenko A.A., Normurodov A.A. Computational studies of the fuel supply process of a diesel engine when it is powered by diesel fuel and biofuels. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №1 (35).

Введение

Углубляющийся энергетический кризис и необходимость снижения выбросов в атмосферу вредных веществ с отработавшими газами (ОГ) двигателей внутреннего сгорания обуславливают необходимость более широкого использования альтернативных топлив [1, 2]. При выборе альтернативного топлива необходимо учитывать наличие обширной сырьевой базы для его производства. В связи с этим значительными преимуществами обладают биотоплива, которые производят из энергетических ресурсов растительного происхождения. К этой группе относятся топлива, вырабатываемые из растительных масел [3, 4]. По ряду своих свойств указанные биотоплива отличаются от свойств нефтяного дизельного топлива (ДТ), поэтому их целесообразно использовать в смесях с ДТ или другими альтернативными топливами. К таким смесям относятся и эмульгированные топлива [5, 6, 7]. При этом недостаточно изученной остается проблема определения параметров потока таких топлив в распылителях дизельных форсунок. Эти параметры оказывают значительное влияние на качество протекания процессов топливоподачи, распыливания топлива и смесеобразования. Целями исследования являлись моделирование топливоподачи дизеля при его питании дизельным топливом и биотопливами, а также сравнительный анализ параметров потока смесевых и эмульгированных топлив в распылителях дизельных форсунок.

Свойства исследуемых топлив и объект исследования

От параметров потока топлива в распылителях форсунок, в первую очередь – от параметров потока на выходе из распыливающих отверстий, в значительной степени зависят экономические и экологические показатели

дизелей [8, 9, 10]. Эти параметры существенно отличаются у смесевых биотоплив (смесей растительных масел с нефтяным ДТ) и у эмульгированных биотоплив (смесей растительных масел с альтернативными топливами, которые не смешиваются с растительными маслами, в частности с этиловым спиртом). При расчетах исследованы нефтяное ДТ марки Л по ГОСТ 305-2013, рапсовое масло (РМ) и эмульсия 70% по массе РМ и 30% этилового спирта (ЭС). В табл. 1 приведены данные по некоторым свойствам исследуемых топлив [7, 11].

При моделировании исследована форсунка типа ФДМ-22 производства Ногинского завода топливной аппаратуры с распылителем типа 171 Алтайского завода прецизионных изделий (АЗПИ). Этот распылитель имел пять распыливающих отверстий диаметром 0,35 мм и длиной 1,1 мм. Максимальный ход иглы распылителя был равен 0,32 мм.

Таблица 1.

Свойства исследуемых топлив при температуре 40 °С

Топлива	Свойства топлив			
	Плотность, кг/м ³	Кинематическая вязкость, мм ² /с	Коэффициент поверхностного натяжения, мН/м	Давление насыщенных паров, кПа
ДТ	822,7	2,4	26,4	4,8
РМ	914,6	36,0	32,3	0
ЭС	782,2	1,1	20,6	18,0
70% РМ и 30% ЭС	883,2	45,0	28,8	5,4

Моделирование течения топлива в распылителе форсунки

При проведении расчетных исследований параметров потока различных топлив рассмотрена симметричная геометрия элемента проточной части распылителя с одним распыливающим отверстием (рис. 1).

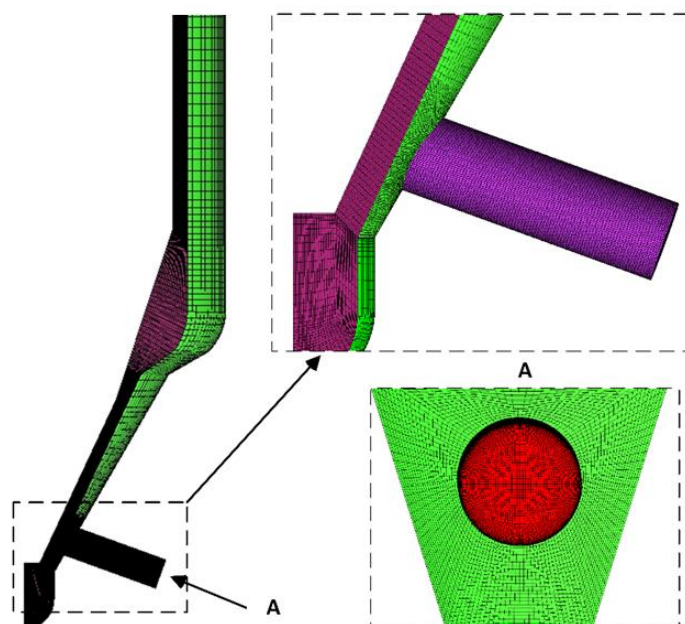


Рис. 1. Модель расчетной сетки исследуемого распылителя форсунки

Моделировалось стационарное течение нефтяного ДТ, РМ и эмульсии 70% РМ и 30% ЭС в проточной части распылителя при максимальном подъеме иглы форсунки. Рассмотрена эмульсия ЭС в РМ с диаметром капель этанола, равным 50 мкм. Топливо считалось несжимаемым.

Расчетные исследования течения топлив в проточной части распылителя были выполнены в программном комплексе *Ansys Fluent* [12]. Течение в распылителе моделировалось с помощью модели многофазного равновесия (модели смесового топлива). С учетом разницы плотностей компонентов в эмульсии использована многофазная модель. Уравнения количества движения использованы для смешанной фазы в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{u}_m) + \nabla(\rho_m \vec{u}_m \otimes \vec{u}_m) = -\nabla(p) + \nabla[(\mu_m + \mu_\tau)(\nabla \vec{u}_m + \nabla^T \vec{u}_m)] - \nabla(\sum_{q=1}^N \alpha_q \rho_q \vec{u}_{dr,q} \vec{u}_{dr,q}),$$

где ρ_m , $\vec{u}_m$, μ_m – плотность, скорость и вязкость смешанной фазы; μ_τ – турбулентная вязкость; N – количество фаз; α_q , ρ_q , $\vec{u}_{dr,q}$ – объемная доля,

плотность и скорость дрейфа фазы q соответственно. Свойства и скорость смешанной фазы определялись в виде:

$$\rho_m = \sum_{q=1}^N a_q \rho_q; \quad \mu_m = \sum_{q=1}^N a_q \rho_q \mu_q; \quad \bar{u}_m = \sum_{q=1}^N a_q \rho_q \bar{u}_q$$

где μ_q и $\bar{u}_q$ – молекулярная вязкость и скорость фазы q . При моделировании потока ДТ его жидкая фаза принимается как первичная фаза, а пузырьки ДТ, образующиеся во время кавитации, принимаются как вторичная фаза. При моделировании эмульсии РМ и ЭС первичной фазой является жидкая фаза РМ, а капельки этанола и кавитационные пузырьки являются вторичными фазами. Поскольку процесс массопереноса между фазами происходит во время кавитации, уравнения сохранения массы для смешанной фазы и паровой фазы выражены следующим образом:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla(\rho_m \bar{u}_m) = 0; \quad \frac{\partial \rho}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla(\alpha_v \rho_v \bar{u}_v) = R_v.$$

Скорость массопереноса вследствие кавитации R_v моделировалась с помощью модели кавитации *Schnerr-Sauer* [13], полученной из уравнения Рэлея-Плессета для одного пузырька с пренебрежением членами поверхностного натяжения, напряжения сдвига и второго порядка:

$$R_v = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \left(\frac{4\pi}{3} n_b \alpha_v \right)^{1/3} (1 - \alpha_v)^{4/3} \left(\frac{2}{3} \left| \frac{p_v - p}{\rho_l} \right| \right)^{1/2}, \quad \text{для } p_v \leq p;$$

$$R_v = -C_{cond} \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \left(\frac{4\pi}{3} n_b \alpha_v \right)^{1/3} (1 - \alpha_v)^{4/3} \left(\frac{2}{3} \left| \frac{p_v - p}{\rho_l} \right| \right)^{1/2}, \quad \text{для } p_v > p,$$

где n_b – число плотности кавитационных пузырьков; C_{cond} – постоянная конденсации пузырьков; ρ_l – это плотность жидкости (ДТ и эмульсии РМ и ЭС). Уравнения сохранения массы замыкаются с помощью условия $\sum_{q=1}^N a_q \rho_q = 1$. Скорость дрейфа фазы q – $\bar{u}_{dr,q}$ вычисляется с учетом

относительной скорости вторичных фаз q, k к первичной фазе $p - \bar{u}_{qp}, \bar{u}_{kp}$ и выражается формулой:

$$\bar{u}_{dr,q} = \bar{u}_{qp} - \sum_{k=1}^N \alpha_k \rho_k \bar{u}_{kp} / \rho_m.$$

Относительная скорость вторичной фазы q по отношению к первичной фазе p рассчитывается по следующей формуле:

$$\bar{u}_{dp} = \frac{\rho_q d_q^2}{18 \mu_q f_e} \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_q}\right) \bar{\alpha},$$

где d_q – размер частиц фазы q (диаметр каплеь этанола или диаметр кавитационного пузырька); f_e – функция сопротивления. Использована функция сопротивления модели *Schiller-Naumann* [14]:

$$f_e = 1 + 0,15 \text{Re}^{0,687} \quad \text{для } \text{Re} \leq 1000 \text{ и } f_e = 0,0183 \text{Re} \quad \text{для } \text{Re} > 1000.$$

где Re – число Рейнольдса, рассчитанное с учетом частиц фазы. Уравнения импульса потока замыкались турбулентной вязкостью, рассчитанной на основе турбулентной кинетической энергии и скорости турбулентной диссипации. Они моделировались с помощью турбулентной модели RANS, реализующей k - ϵ модель турбулентности [15].

Результаты моделирования течения топлива в распылителе

Моделирование течения ДТ, РМ и указанной эмульсии было выполнено при давлении на входе в расчетную область 51,5 МПа и двух различных противодавлениях – 0,1 и 8,9 МПа. Противодавление, равное 0,1 МПа, соответствует атмосферному, а противодавление, равное 8,9 МПа, соответствует давлению в камере сгорания дизеля в момент начала впрыска. Температура топлива принята постоянной и равной 40 °С.

Для анализа характеристик потока указанных топлив по распыливающему отверстию использована одноосная система отчета, исходная точка которой совпадает с центром входного сечения отверстия, а ось координат направлена по оси отверстия. Расстояние от указанной точки

до текущего поперечного сечения отверстия обозначается как l_p . Значение $l_p = 0$ мм соответствует входному отверстию, а значение $l_p = 1,1$ мм – выходному отверстию. Расчетные значения массового расхода и коэффициента расхода при течении топлив приведены в табл. 2. Эти данные показывают, что по сравнению с РМ использование эмульсии РМ и ЭС снижает массовый расход топлива в основном из-за снижения плотности эмульсии. При этом из-за высокого давления насыщенного пара этанола увеличивается кавитация внутри распыливающего отверстия, что снижает коэффициент расхода. По сравнению с нефтяным ДТ течение эмульсии РМ и ЭС характеризуется большим расходом топлива и пониженным коэффициентом расхода. В основном это объясняется относительно высокими плотностью и вязкостью эмульсии. При противодавлениях 8,9 и 0,1 МПа и переходе от ДТ на эмульсию коэффициент расхода снижается, соответственно на 8,8% и 7,3%.

Таблица 2.

Расчетные значения параметров потока топлива

Противодавление, МПа	Вид топлива	Расход, г/с	Коэффициент расхода
0,1	ДТ	14,42	0,52
	РМ	16,58	0,56
	Эмульсия РМ и ЭС	14,58	0,51
8,9	ДТ	14,39	0,57
	РМ	14,96	0,56
	Эмульсия РМ и ЭС	14,56	0,55

Представленные на рис. 2, а расчетные характеристики показывают, что скорость потока топлива значительно увеличивается при входе в отверстие распылителя, что объясняется образованием области пониженного давления в результате резкого изменения направления течения (рис. 3) и

возникновения кавитации. Ее появление подтверждается данными по объемной доле паров топлива в поперечном сечении отверстия распылителя (рис. 2,б) и распределением этих паров в продольном сечении отверстия (рис. 4). Из рис. 2,а также видно, что в каждом поперечном сечении отверстия ДТ имеет наивысшую усредненную осевую скорость во всех исследованных условиях. При этом скорость течения эмульсии всегда больше, чем у РМ, а наивысшую скорость течения имеет ДТ.

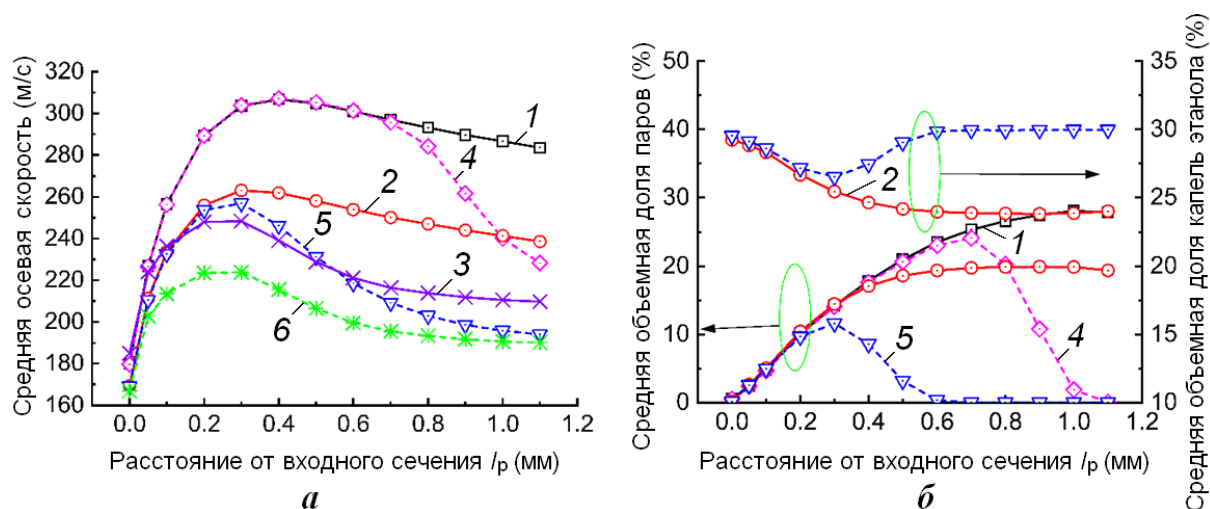


Рис. 2. Усредненные по поперечному сечению отверстия значения осевой скорости потока (а) и объемной доли паров (б) для исследуемых топлив при различных противодавлениях [МПа]: 1 – ДТ; 0,1; 2 – эмульсия; 0,1; 3 – РМ; 0,1; 4 – ДТ; 8,9; 5 – эмульсия; 8,9; 6 – РМ; 8,9

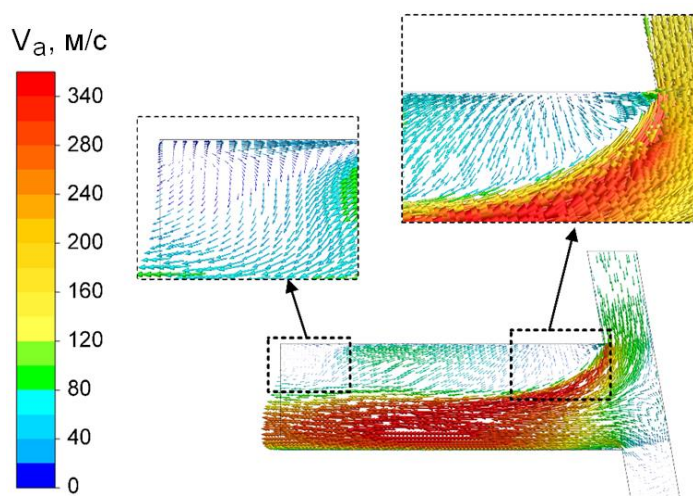


Рис. 3. Распределение вектора скорости V_a потока в продольном сечении распыливающего отверстия при противодавлении 8,9 МПа

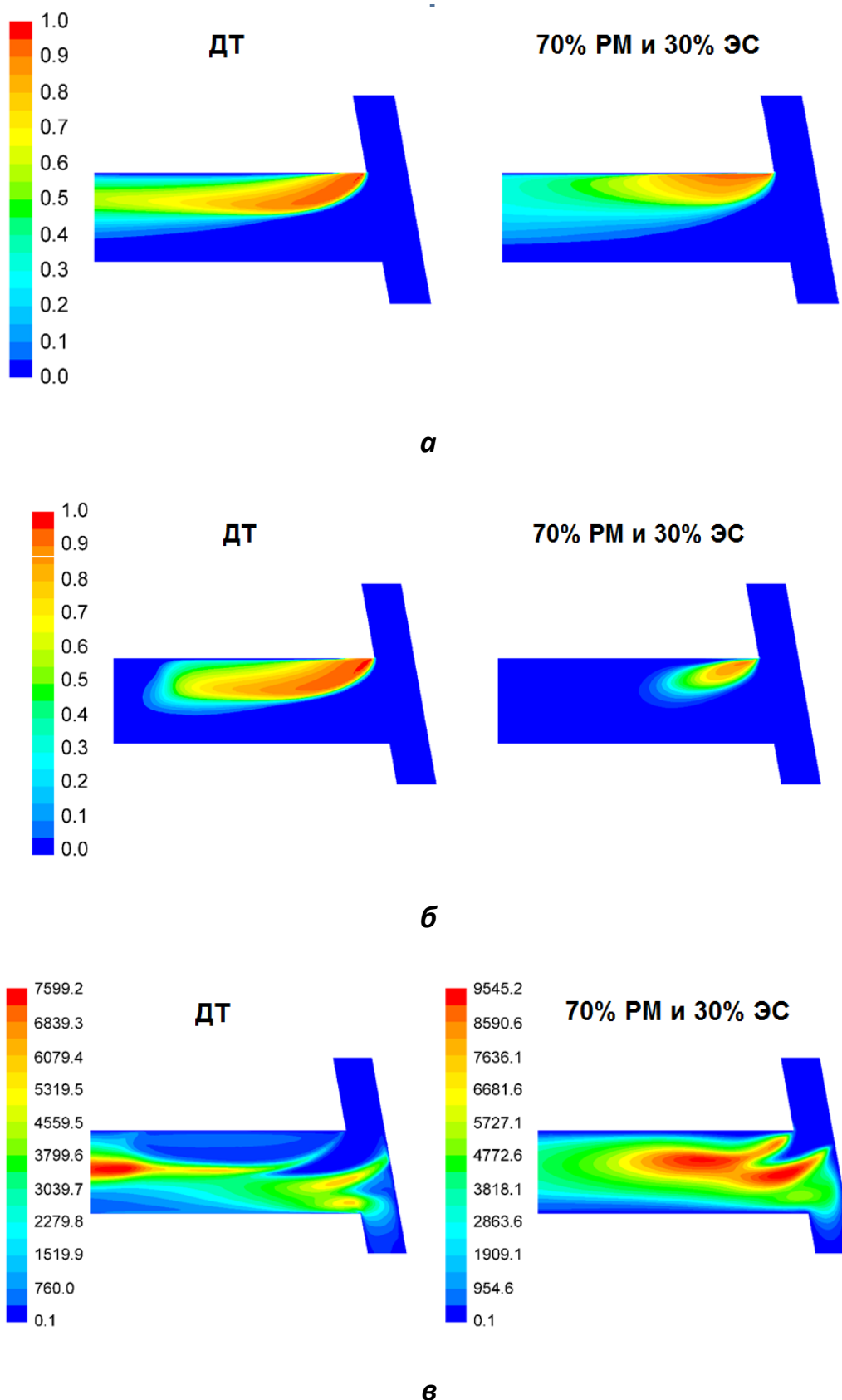


Рис. 4. Распределение объемной доли паров топлива в продольном сечении отверстия распылителя при противодавлениях 0,1 МПа (а) и 8,9 МПа (б), распределение кинетической энергии турбулентности ($\text{м}^2/\text{с}^2$) при противодавлении 8,9 МПа (в)

Высокая турбулентность потока топлива на выходе из распыливающего отверстия ускоряет распад струи и улучшает качество смесеобразование. При противодавлении 8,9 МПа вход топлива в отверстие характеризуется резким увеличением кинетической энергии турбулентности (рис. 5) из-за изменения направления потока, резкого сужения проходного сечения, появления вихрей и генерации кавитационных пузырьков. Затем при течении топлива по распыливающему отверстию эта энергия постепенно рассеивается. При течении ДТ и наличии противодавления (8,9 МПа) вблизи выхода из отверстия ($l_p = 0,8 \dots 1,1$) из-за конденсации паров в кавитационных пузырьках образуются вихри, которые увеличивают кинетическую энергию турбулентности (см. рис. 2,б, 4,б, 4,в). В процессе течения эмульсии по отверстию эта энергия рассеивается. При наличии противодавления наибольшее значение кинетической энергии турбулентности на выходе из отверстия характерно для ДТ, но величина этой энергии соизмерима с аналогичной энергией у эмульсии. При противодавлении 0,1 МПа максимальная кинетическая энергия турбулентности на выходе из отверстия отмечена для РМ, а минимальная – для ДТ (см. рис. 5).

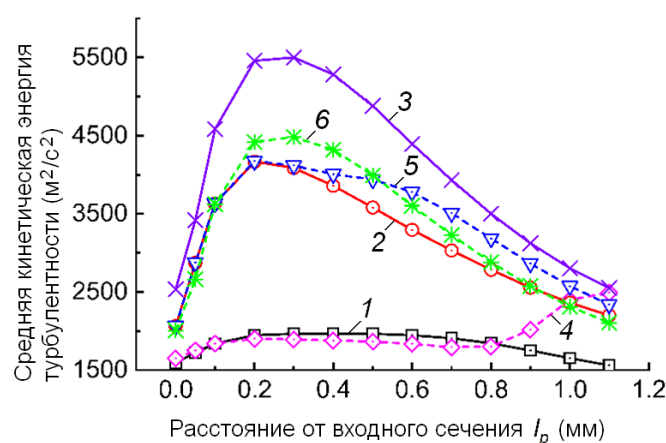


Рис. 5. Усредненные по поперечному сечению отверстия значения кинетической энергии турбулентности для исследуемых топлив при различных противодавлениях [МПа]: 1 – ДТ; 0,1; 2 – эмульсия; 0,1; 3 – РМ; 0,1; 4 – ДТ; 8,9; 5 – эмульсия; 8,9; 6 – РМ; 8,9

В целом, при течении эмульсии РМ и ЭС скорость течения топлива в распыливающих отверстиях уменьшается по сравнению с течением ДТ (см. рис. 2.а). Но меньшая скорость течения эмульсии отчасти компенсируется дополнительной турбулизацией ее струй за счет низкой температуры испарения этанола. При этом в камере сгорания дизеля наблюдается резкое испарение капель этанола, что способствуют более качественному распыливанию эмульгированного биотоплива.

Результаты расчетных исследований течения рассматриваемых топлив в распылителе форсунки позволяют предположить наличие различий в характере протекания дальнейших процессов распыливания топлива, смесеобразования и сгорания. Существующие различия распределений энергетических характеристик потоков рассматриваемых топлив, безусловно, окажут влияние и на показатели топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля, работающего на исследуемых видах топлива.

Заключение

1. Расчетные исследования параметров течения исследуемых топлив – нефтяного дизельного топлива (ДТ), рапсового масла (РМ), эмульсии 70% РМ и 30% этилового спирта (ЭС) подтвердили влияние свойств этих топлив на параметры потока топлива в распылителе форсунки.

2. Эмульгирование РМ этанолом существенно влияет на параметры потока в распылителе. При обоих рассматриваемых противодавлениях впрыскиванию (0,1 и 8,9 МПа) наибольшую скорость течения топлива на выходе из распыливающего отверстия имеет нефтяное дизельное топливо, среднюю – эмульсия, а наименьшую – рапсовое масло.

3. При противодавлении 0,1 МПа наибольшая кинетическая энергия турбулентности на выходе из распыливающего отверстия отмечена для рапсового масла, средняя – для эмульсии, а наименьшая – для дизельного топлива. При противодавлении 8,9 МПа кинетическая энергия

турбулентности у трех рассматриваемых топлив оказалась соизмеримой, но ее наибольшее значение отмечено для рапсового масла.

4. Меньшая по сравнению с дизельным топливом скорость течения эмульсии отчасти компенсируется дополнительной турбулизацией ее струй за счет низкой температуры испарения этанола. При этом в камере сгорания дизеля наблюдается резкое испарение капель этанола, что способствуют более качественному распыливанию эмульгированного биотоплива.

Список источников

1. Мельник, Г.В. Возобновляемые источники энергии / Г.В. Мельник // Двигателестроение. – 2007. – № 3. – С. 47-51.
2. Мельник, Г.В. Альтернативные топлива (материалы конгресса СИМАС-2016) / Г.В. Мельник // Двигателестроение. – 2019. – № 4. – С. 38–57.
3. 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.
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. 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.
6. Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания / В.А. Марков [и др.]. – М.: НИЦ «Инженер» (Союз НИО), 2016. – 292 с.
7. Бирюков, В.В. Методы повышения эффективности работы дизеля при использовании этанола в качестве экологической добавки к дизельному топливу: дис. ... канд. тех. наук / В.В. Бирюков. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 173 с.
8. Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях / В.А. Марков [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 360 с.
9. Совершенствование процессов распыливания топлива и смесеобразования при работе дизеля на смесевых биотопливах / В.А. Марков [и др.] // Двигателестроение. – 2021. – № 1. – С. 3-12.
10. 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.

11. Markov, V.A. Investigation of the Influence of Different Vegetable Oils as a Component of Blended Biofuel on Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine for Agricultural Machinery and Commercial Vehicles / V.A. Markov, V.G. Kamaltdinov, S.N. Devyanin [et al.] // Resources. – 2021. – Vol. 10. – Issue 8. – Art. no 74. – P. 1-23.
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. Schnerr, G.H. Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics / G.H. Schnerr, J. Sauer // Conference: ICMF-2001, 4th International Conference on Multiphase Flow, New Orleans. – 2001. – P. 1-12.
14. Schiller, L. A Drag Coefficient Correlation / L. Schiller, Z. Naumann // Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure. – 1935. – Jg. 77. – S. 318-323.
15. Goldberg U., Perroomian O., Chakravarthy S. A Wall-Distance-Free $k-\varepsilon$ Model With Enhanced Near-Wall Treatment // Journal of Fluids Engineering. – Vol. 120. – № 3. – P. 457-462.

References

1. Mel'nik G.V. *Dvigatelsestrojenije*, 2007, no 3, pp. 47-51.
2. Mel'nik G.V. *Dvigatelsestrojenije*, 2019, no 4, pp. 38-57.
3. 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.
4. Piskunov I.V., Ershov M.A., Glagoleva O.F. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2021, no 6, pp. 39-46.
5. 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.
6. Markov V.A., Devyanin S.N., Zykov S.A., Gaidar S.M. *Biotopliva dlja dvigatelej vnutrennego sgoraniya* (Biofuels for Internal Combustion Engines), Moscow, «Ingener» Publishing, 2016, 292 p.
7. Birjukov V.V. *Metody povysheniya `effektivnosti raboty dizelja pri ispol'zovanii `etanola v kachestve `ekologicheskoy dobavki k dizel'nomu toplivu* (Methods for Improving Diesel Engine Efficiency when Using Ethanol as an Environmental Additive to Diesel Fuel), PhD thesis, Moscow, BMSTU, 2017, 173 p.
8. Markov V.A., Devyanin S.N., Makhuk V.I. *Vpryskivanie i raspylivanie topliva v dizeljah* (Fuel Injection and Atomization in Diesel Engines), Moscow, BMSTU Publishing, 2007, 360 p.
9. Markov V.A., Kuleshov A.S., Neverov V.A. et al. *Dvigatelsestrojenije*, 2021, no 1, pp. 3-12.
10. Plotnikov S.A., Kantor P.Ya., Motovilova M.V. *Dvigatelsestrojenije*, 2020, no 2, pp. 19-23.

11. Markov V., Kamaltdinov V., Devyanin S.N. et al. Investigation of the Influence of Different Vegetable Oils as a Component of Blended Biofuel on Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine for Agricultural Machinery and Commercial Vehicles, *Resources*, 2021, vol. 10, issue 8, art. no 74, pp. 1-23.
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. Schnerr G.H., Sauer J. Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics, *Conference: ICMF-2001*, 4th International Conference on Multiphase Flow, New Orleans, 2001, pp. 1-12.
14. Schiller L. Naumann Z. A Drag Coefficient Correlation, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 1935, jg. 77, ss. 318-323.
15. Goldberg U., Perroomian O., Chakravarthy S. A Wall-Distance-Free $k-\epsilon$ Model With Enhanced Near-Wall Treatment, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 120, no 3, pp. 457-462.

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.
Савастенко Андрей Александрович, канд. техн. наук, доц., МАДИ.
Нормуродов Акбаржон Анварович, аспирант, 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.
Savastenko Andrey A., Ph.D., associate professor, MADI.
Normurodov Akbarjon A., postgraduate, BMSTU.

Статья поступила в редакцию 28.02.2023; одобрена после рецензирования 24.03.2023; принята к публикации 27.03.2023.

The article was submitted 28.02.2023; approved after reviewing 24.03.2023; accepted for publication 27.03.2023.