УДК 662.758.2

Физико-химический анализ и моделирование процессов горения смесевых топлив в дизельном двигателе

С.А. Плотников[1], А.В. Масалимов[2], П.Ю. Малышкин[3], А.А. Ошмарин[1], М.А. Стародумов[1]

[1] ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»
[2] Новотроицкий филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСИС»
[3] Белорусский национальный технический университет

Physicochemical analysis and modeling of combustion processes of mixed fuels in a diesel engine

S.A. Plotnikov[1], A.V. Masalimov[2], P.Yu. Malyshkin[3], A.A. Oshmarin[1], M.A. Starodumov[1]

[1] Vyatka State University
[2] National University of Science and Technology «MISIS»
[3] Belarusian National Technical University

Проведено комплексное численное математическое моделирование процессов горения смесевых топлив в дизельном двигателе. Исследование направлено на детальный термодинамический и кинетический анализ горения как традиционного дизельного топлива, так и его смесей с этанолом и олеиновой кислотой, представляющих растительные масла. В условиях протекания конкурирующих за кислород химических реакций выполнен расчет основных параметров: изменений внутренней энергии и энтропии, температуры начала реакции и скоростей горения. Моделирование выполнено с учетом политропного характера процесса и изменяющейся температуры. Показано, что введение этанола увеличивает общую скорость сгорания смеси по сравнению с таковой чистого дизельного топлива. В то же время добавление олеиновой кислоты приводит к нелинейному снижению скорости процесса, хотя эффект частично компенсируется ростом температуры в камере сгорания. Полученные результаты имеют практическую ценность для оптимизации состава смесевых топлив и регулирования режимов работы дизельного двигателя с целью повышения его эффективности и экологических показателей.

EDN: PAXHRF, https://elibrary/paxhrf

Ключевые слова: смесевые топлива, дизельное топливо, скорость горения, термодинамическое и кинетическое моделирование

The article presents a comprehensive numerical mathematical modeling of the combustion processes of composite fuels in a diesel engine. The research focuses on a detailed thermodynamic and kinetic analysis of the combustion of both traditional diesel fuel and its blends with ethanol and oleic acid, representing vegetable oils. The calculation of key parameters was carried out under conditions of competitive chemical reactions for oxygen: changes in internal energy and entropy, reaction initiation temperature, and combustion rates. The modeling was performed considering the polytropic character of the process and the changing temperature. It is shown that the introduction of ethanol increases the overall combustion rate of the mixture compared to pure diesel fuel. At the same time, the addition of oleic

acid leads to a non-linear decrease in the process rate, although the effect is partially compensated by the temperature rise in the combustion chamber. The obtained results are of practical value for optimizing the composition of composite fuels and adjusting the operating parameters of a diesel engine to improve its efficiency and environmental performance.

EDN: PAXHRF, https://elibrary/paxhrf

Keywords: composite fuels, diesel fuel, combustion rate, thermodynamic and kinetic modeling

Замена дизельного топлива (ДТ) смесевым (СТ) позволяет уменьшить зависимость от ископаемых ресурсов, а также затраты благодаря использованию более доступных компонентов — растительных масел. Кроме того, правильная дозировка компонентов СТ дает возможность адаптации под конкретные условия эксплуатации, снижая экологическую нагрузку на окружающую среду.

В настоящее время многие исследователи занимаются вопросами математического моделирования процессов горения альтернативного топлива в дизельном двигателе [1–9]. Это делает исследование характеристик СТ важной и актуальной задачей для обеспечения оптимизации составов, а также регулирования режимов работы дизельного двигателя.

Цель работы — моделирование химических и физико-химических процессов, протекающих при горении СТ в условиях двигателя внутреннего сгорания.

Горение — сложный физико-химический процесс, который в дизельном двигателе осложнен процессами впрыска, смесеобразования и тепломассообмена, связанного с испарением топлива. Кроме того, условия в камере сгорания дизельного двигателя характеризуются высокими значениями температуры и давления, а также их быстрым изменением ввиду того, что протекающие в ней процессы являются политропными.

В качестве объектов исследования выбраны традиционное ДТ в виде н-гексадекана ($C_{16}H_{34}$) и два СТ, состоящие из классического ДТ с добавлением этанола (C_2H_5OH) и сурепного масла, представленного основным компонентом — олеиновой кислотой ($C_{17}H_{33}COOH$).

Реакции горения этих топлив описываются уравнениями

$$C_{16}H_{34г} + 24,5O_{2г} \rightarrow 16CO_{2г} + 17H_2O_г; \quad (1)$$

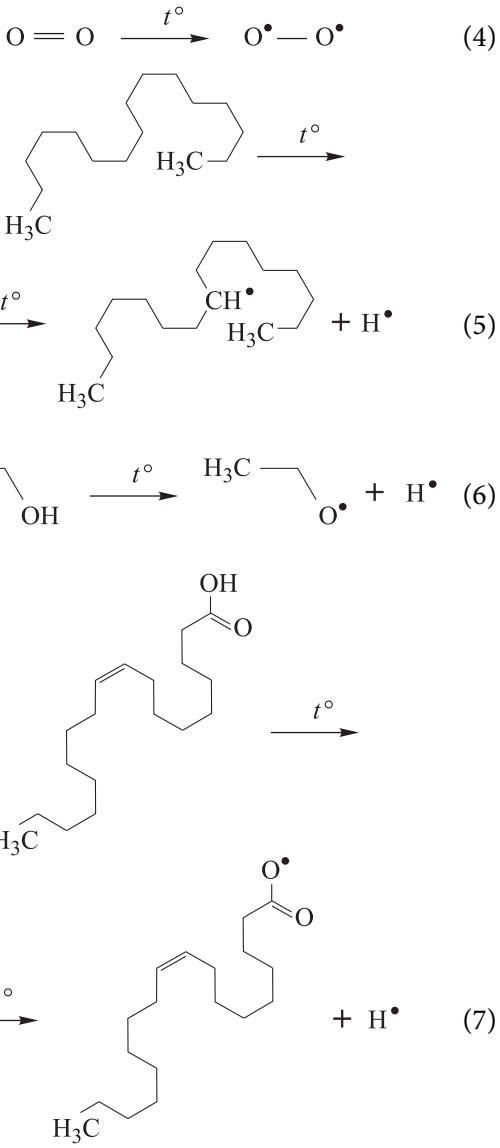
$$C_2H_5OH_г + 3O_{2г} \rightarrow 2CO_{2г} + 3H_2O_г; \quad (2)$$

$$C_{17}H_{33}COOH_г + 25,5O_{2г} \rightarrow 18CO_{2г} + 17H_2O_г, \quad (3)$$

где индекс «г» соответствует газу.

Процесс горения топлива независимо от его природы носит цепной радикальный характер, состоящий из трех основных стадий: инициации, развития и обрыва цепи.

Инициация реакций осуществляется путем гомолитической реакции диссоциации органической молекулы и молекулы кислорода в соответствии со следующими уравнениями реакций:



На стадии инициации реакции затрачивается наибольшее количество энергии и преодоле-

вается основной энергетический барьер. Термодинамические характеристики реакций при стандартных условиях приведены в табл. 1 [10–17]. Видно, что значения энергии активации для первых стадий реакции (5)–(7) значительно больше, чем для реакции в целом. Энтальпия для этих реакций также имеет высокое положительное значение, что указывает на существенные затраты энергии с позиции термодинамики процесса.

Это означает, что именно стадия диссоциации является лимитирующей в процессе воспламенения. Важным элементом в этом механизме служит кислород, так как он способен образовывать бирадикал — реакция (4) — со значительно меньшим энергетическим барьером (рис. 1), хотя и требует больше энергии для разрыва химической связи.

Таблица 1

Термодинамические характеристики реакций при стандартных условиях

Номер реакции	Изменение энтальпии в реакции $\Delta_r H^0_{298}$, кДж/моль	Изменение энтропии в реакции $\Delta_r S^0_{298}$, Дж/(моль·К)	Энергия активации E_a, кДж/моль
(1)	–9951	+1003	126
(2)	–1235	+217	85
(3)	–10 412	+1251	145
(4)	+498	+2,2	225
(5)	+410	+120	410
(6)	+430	+130	430
(7)	+400	+130	400

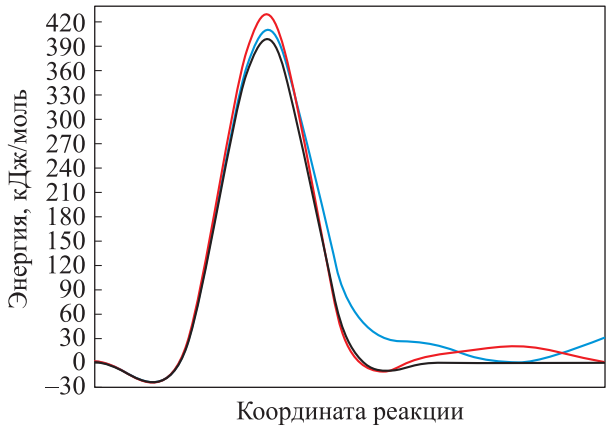


Рис. 1. Энергетические барьеры при протекании реакций (1)–(3):
— ДТ; — этанол; — олеиновая кислота

Анализ энергетических барьеров показывает высокие кинетические трудности на первой стадии реакции. У ДТ и этанола можно заметить наличие второго энергетического барьера, значительно более низкого, чем первый, но также оказывающего влияние на характер протекания реакции.

Таким образом, процесс горения при стандартных условиях осложнен как кинетическими факторами, так и термодинамическими, а следовательно, требует инициации в виде источника огня, искры или облучения значительными дозами ультрафиолета. Однако в условиях камеры сгорания эти термодинамические параметры меняются. Энергия активации не зависит от температуры и давления.

Пересчитаем стандартные термодинамические функции по уравнениям

$$\Delta_r H^P_T = \Delta_r H^0_{298} + \int_{298}^{T_s} \Delta_r C_v(T) dT;$$

$$\Delta_r S^P_T = \Delta_r S^0_{298} + \int_{298}^{T_s} \frac{\Delta_r C_v(T)}{T} dT,$$

где T_s — температура в камере сгорания, $T_s = 1100$ К;

$\int_{298}^{T_s} \Delta_r C_v$ — изменение мольной теплоемкости при постоянном объеме в ходе химической реакции.

Ввиду того, что процесс горения топлива в цилиндре дизельного двигателя политропный, для расчета термодинамических параметров необходимо перейти от изменения энтальпии к изменению внутренней энергии $\Delta_r U^P_T$ с помощью формулы

$$\Delta_r U^P_T = \Delta_r H^P_T - RT\Delta_r n.$$

Температуру начала реакции $T_{\text{н.р}}$ в этих условиях можно оценить исходя из условия равенства нулю свободной энергии Гельмгольца ($\Delta_r F = 0$), определяемой выражением

$$\Delta_r F = \Delta_r U^P_T - T\Delta_r S^P_T,$$

где $\Delta_r n$ — изменение числа моль газов в ходе реакции.

Результаты моделирования приведены в табл. 2, где температура начала реакции определена по выражению

$$T_{\text{н.р}} = \frac{\Delta_r U^P_T}{\Delta_r S^P_T}.$$

Таблица 2

Термодинамические параметры горения компонентов СТ

Компонент СТ	$\Delta_r U^{75}_{1100}$, кДж/моль	$\Delta_r S^{75}_{1100}$, Дж/(моль·К)	$T_{н.р}$, К
Этанол	–1263,1	155,0	171,8
Олеиновая кислота	–10 486,0	1332,0	121,9
ДТ	–7805,0	456,0	171,1

Кинетические параметры горения можно найти исходя из закона действующих масс

$$V = k[G]^a [O_2]^b \qquad (8)$$

и уравнения Аррениуса

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}},$$

где V — скорость реакции; k — коэффициент пропорциональности; $[G]$ и $[O_2]$ — концентрации горючего и кислорода; a и b — порядок реакции по горючему и кислороду соответственно; A — предэкспоненциальный множитель, определяемый природой веществ; R — универсальная газовая постоянная, R = = 8,314 Дж/(моль·К).

Кинетические параметры горения чистых компонентов СТ и ДТ приведены в табл. 3.

Анализ данных табл. 3 позволяет заключить, что в чистом виде наибольшую скорость горения и самую раннюю инициацию имеет ДТ, что обусловлено наличием в его составе относительно коротких углеводородов (C_{11}, C_{12}). Этанол инициируется и горит почти втрое медленнее, чем олеиновая кислота.

Моделирование горения СТ проведено с использованием аддитивности при их смешении, обеспечиваемой в первую очередь благодаря тому, что этанол и олеиновая кислота нерастворимы в ДТ и образуют отдельную фазу. Это обеспечивает независимость процессов их воспламенения и горения, сказываясь лишь на общем тепловом эффекте.

Таблица 3

Кинетические параметры горения чистых компонентов СТ и ДТ

Компонент топлива	Предэкспоненциальный множитель A, моль/см^3	Порядок реакции		Время сгорания одного моля топлива τ_i, с
		a	b	
Этанол	$1{,}25\cdot10^3$	0,15	0,5	$3{,}45\cdot10^{-3}$
Олеиновая кислота	$4{,}6\cdot10^{11}$	0,25	1,5	$1{,}32\cdot10^{-3}$
ДТ	$4{,}6\cdot10^{11}$	0,25	1,5	$6{,}44\cdot10^{-4}$

Так как по потреблению кислорода эти реакции являются конкурирующими, необходимо выразить скорости горения топлива и кислорода в СТ. Применяя дифференциальную форму закона действующих масс, получаем выражения

$$V_1 = \frac{d[G_1]}{d\tau} = -k_1[G_1]^{a_1}[O_2]^{b_1}; \qquad (9)$$

$$V_2 = \frac{d[G_2]}{d\tau} = -k_2[G_2]^{a_2}[O_2]^{b_2}; \qquad (10)$$

$$\frac{d[O_2]}{d\tau} = -\nu_1 k_1[G_1]^{a_1}[O_2]^{b_1} - \nu_2 k_2[G_2]^{a_2}[O_2]^{b_2},$$

где индекс «1» соответствует первому компоненту СТ, а индекс «2» второму; ν_1, ν_2 — коэффициенты при кислороде в соответствующих уравнениях горения, а знак минус указывает на уменьшение концентрации в ходе реакции.

При подаче СТ целесообразно уйти от отдельных концентраций компонентов, выразив их через количество поданной смеси с помощью мольной доли. Для двухкомпонентной системы запишем

$$[G_1] = x[G_{СТ}];$$

$$[G_2] = (1-x)[G_{СТ}],$$

где x — мольная доля одного из компонентов СТ; $[G_{СТ}]$ — концентрация СТ.

После некоторых преобразований получаем выражение для скорости реакции горения СТ

$$V_{СТ} = A_1 e^{-\frac{E_{a_1}}{RT}} x[G_{СТ}]^{a_1}[O_2]^{b_1} +$$

$$+ A_2 e^{-\frac{E_{a_2}}{RT}} ([1-x][G_{СТ}])^{a_2}[O_2]^{b_2}. \qquad (11)$$

Время горения СТ

$$\tau = \frac{[G_{СТ}]}{V_{СТ}}.$$

Расчет материального баланса и концентраций СТ — количества воздуха на горение — выполнен при условии, что после горения в дымовых газах содержится 4 % кислорода. Полнота сгорания принята равной 99 % начального количества СТ. Изменения скоростей горения ДТ и СТ согласно уравнениям (8)–(11) показаны на рис. 2, *а–в*. Причем скорости

горения учтены независимо для каждого компонента СТ, как и их изменение концентрации на каждом шаге расчета.

Также процесс горения смоделирован с учетом изменения температуры на каждом шаге, для чего к модели добавлено уравнение

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{C_v}\left(-\Delta H_1 A_1 e^{-\frac{E_{a1}}{RT}}[G_1]^{a1}[O_2]^{b1} - \right.$$

$$\left. - \Delta H_2 A_2 e^{-\frac{E_{a2}}{RT}}[G_2]^{a2}[O_2]^{b2}\right).$$

В обоих случаях система дифференциальных уравнений решена численно методом LSODA (Linear-Synchronous Ordinary Differential Equation Algorithm — линейно-синхронный алгоритм решение обыкновенных дифференциальных уравнений) с шагом конверсии СТ, равным 1 %.

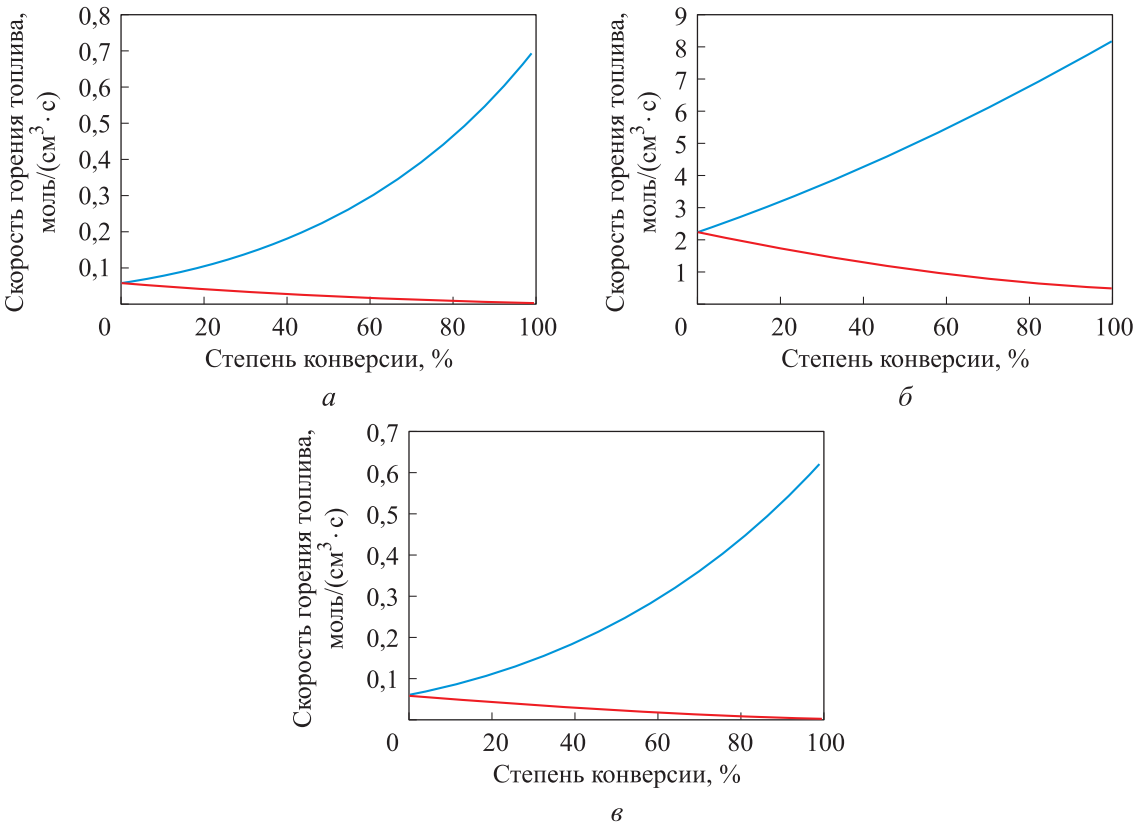


Рис. 2. Зависимости скорости горения ДТ (*а*), СТ с этанолом (*б*) и СТ с олеиновой кислотой от степени конверсии с учетом концентрации растительного масла (——) и температуры (——)

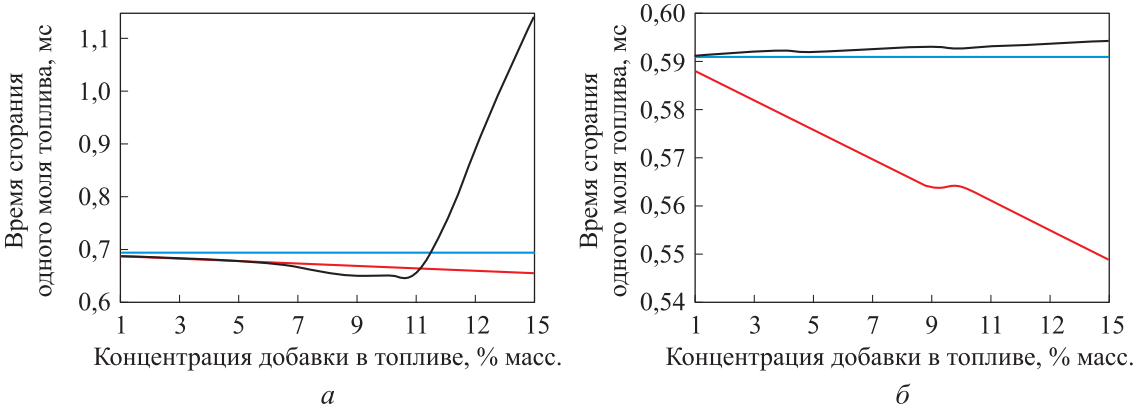


Рис. 3. Зависимости времени сгорания одного моля топлива от концентрации добавки в топливе без учета (*а*) и с учетом (*б*) роста температуры в процессе горения ДТ (——), СТ с этанолом (——) и СТ с олеиновой кислотой (——)

Для расчета степени конверсии СТ на каждом шаге использовано выражение

$$\chi = 1 - \frac{[G_1] + [G_2]}{[G_{\text{СТ}}]_0},$$

где $[G_{\text{СТ}}]_0$ — начальное количество СТ.

Как видно из рис. 2, *а–в* температура оказывает более значительное влияние на скорость горения, чем расход компонентов в процессе реакции. Этанол выгорает значительно быстрее ДТ. При степени конверсии χ = 55 % этанол почти полностью сгорает, что объясняет более быстрое снижение скорости горения в зависимости от концентраций и более медленный рост в зависимости от температуры по сравнению с другими топливами.

Зависимости времени сгорания одного моля топлива от его состава с учетом роста температуры в процессе горения ДТ, СТ с этанолом и СТ с олеиновой кислотой показаны на рис. 3, *а* и *б*. Видно, что СТ с этанолом сгорает быстрее, чем чистое ДТ. Это обусловлено более высокими скоростями горения самих веществ, а также тем, что в процессе горения эти процессы идут параллельно, конкурируя за кислород. В то же время скорость горения олеиновой кислоты снижается по мере роста ее содержания в СТ.

Выводы

1. Проведено термодинамическое и кинетическое моделирование процессов горения СТ в камере сгорания дизельного двигателя.

2. Показано, что при введении в ДТ дополнительных не смешивающихся с ним компонентов можно получить прирост скорости горения этанола. Добавление растительных масел к ДТ может изменить скорость горения как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения, но прирост температуры в ходе процесса горения нивелирует эти колебания, делая процесс горения с растительными маслами медленнее, чем у чистого ДТ.

Литература

[1] Плотников С.А., Заболотских Г.Э., Ошмарин А.А. и др. *Расчет характеристик впрыскивания альтернативного топлива*. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ РФ 2024686009. Заявл. 05.11.2024, опубл. 05.11.2024.

[2] Плотников С.А., Заболотских Г.Э., Ошмарин А.А. и др. *Расчет параметров фазы быстрого горения при работе дизеля на биоминеральных топливных смесях «ФБГ-БМТС»*. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ РФ 2024686935. Заявл. 13.11.2024, опубл. 13.11.2024.

[3] Плотников С.А., Ошмарин А.А. Разработка программного обеспечения для определения показателей работы ДВС. *Общество. Наука. Инновации (НПК-2025). Гуманитарные, общественные, физико-математические, компьютерные, химико-биологические и технические науки. Сб. мат. XXV Всерос. науч.-практ. конф*. Киров, ВятГУ, 2025, с. 399–406.

[4] Шароглазов Б.А., Фарафонтов М.Ф., Клементьев В.В. *Двигатели внутреннего сгорания*. Челябинск, Изд-во ЮУрГУ, 2006. 382 с.

[5] Болоев П.А., Бодякина Т.В., Гергенова Т.П. и др. Моделирование процесса сгорания альтернативного топлива в двигателях внутреннего сгорания. *Тракторы и сельхозмашины*, 2024, т. 91, № 1, с. 5–12, doi: https://doi.org/10.17816/0321-4443-322839

[6] Марков В.А., Девянин С.Н., Бовэнь Са и др. Исследование работы дизельного двигателя на смесевых и эмульгированных биотопливах с добавками рапсового масла. *Двигателестроение*, 2023, № 1, с. 70–90.

[7] Павлов Д.А., Королев В.В. Особенности моделирования рабочего процесса двигателей, работающих на альтернативном топливе, в структуре измерительного комплекса. *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. Т. 1. Санкт-Петербург, СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2020, с. 293–295.

[8] Ивашкевич О.А., Кухаренок Г.М., Петрученко А.Н. и др. Анализ рабочего процесса дизеля при работе на смесевом биотопливе. *Вестник БНТУ*, 2007, № 6, с. 71–76.

[9] Марков В.А., Чайнов Н.Д., Лобода С.С. Физико-химические свойства смесевых дизельных биотоплив с добавками растительных масел и их воспламеняемость. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2018, № 4, с. 115–128, doi: http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2018-4-115-128

[10] Ristori A., Dagaut P., Pengloan G. et al. The oxidation of n-Hexadecane: experimental and detailed kinetic modeling. *Combust. Flame*, 2001, vol. 125, no. 3, pp. 1128–1137, doi: https://doi.org/10.1016/S0010-2180(01)00232-2
[11] Seshadri K., Lu T., Liebe D.M. On the estimation and validation of global single-step kinetics parameters of ethanol-air oxidation using diffusion flame extinction data. *Combust. Sci. Technol.*, 2010, vol. 183, no. 1, pp. 43–50, doi: https://doi.org/10.1080/00102202.2010.497516
[12] Westbrook C.K., Dryer F.L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames. *Combust. Sci. Technol.*, 1981, vol. 27, no. 1–2, pp. 31–43, doi: https://doi.org/10.1080/00102208108946970
[13] Zhang X., Li Y., Wang J. et. al. Reaction mechanism of pyrolysis and combustion of methyl oleate: a reaxff-MD analysis. *Energies*, 2024, vol. 17, no. 14, art. 3536, doi: https://doi.org/10.3390/en17143536
[14] Hexadecane. *webbook.nist.gov: веб-сайт*. URL: https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C544763&Mask=2 (дата обращения: 05.10.2025).
[15] Oleic acid. *pubchem.ncbi.nlm.nih.gov: веб-сайт*. URL: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Oleic-Acid (дата обращения: 05.10.2025).
[16] Standard enthalpy of formation, Gibbs energy of formation, entropy and molar heat capacity of organic substances. *engineeringtoolbox.com: веб-сайт*. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/standard-enthalpy-formation-value-Gibbs-free-energy-entropy-heat-capacity-organic-d_1979.html (дата обращения: 05.10.2025).
[17] Standard thermodynamic properties of chemical substances. *sciencemadness.org: веб-сайт*. URL: https://www.sciencemadness.org/whisper/files.php?pid=302004&aid=26533 (дата обращения: 05.10.2025).

References

[1] Plotnikov S.A., Zabolotskikh G.E., Oshmarin A.A. et al. *Raschet kharakteristik vpryskivaniya alternativnogo topliva* [Calculation of alternative fuel injection characteristics]. Software state registration certificate RU 2024686009. Appl. 05.11.2024, publ. 05.11.2024. (In Russ.).
[2] Plotnikov S.A., Zabolotskikh G.E., Oshmarin A.A. et al. *Raschet parametrov fazy bystrogo goreniya pri rabote dizelya na biomineralnykh toplivnykh smesyakh «FBG-BMTS»* [Calculation of rapid combustion phase parameters during diesel engine operation on FBG-BMTS biomineral fuel mixtures]. Software state registration certificate RU 2024686935. Appl. 13.11.2024, publ. 13.11.2024. (In Russ.).
[3] Plotnikov S.A., Oshmarin A.A. [Development of software for determining internal combustion engine performance indicators]. *Obshchestvo. Nauka. Innovatsii (NPK-2025). Gumanitarnye, obshchestvennye, fiziko-matematicheskie, kompyuternye, khimiko-biologicheskie i tekhnicheskie nauki. Sb. mat. XXV Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Society. Science. Innovations (NPC-2025). Humanities, Social, Physical and Mathematical, Computer, Chemical and Biological, and Technical Sciences. Proc. XXV Russ. Sci.-Pract. Conf.]. Kirov, VyatGU Publ., 2025, pp. 399–406. (In Russ.).
[4] Sharoglazov B.A., Farafontov M.F., Klementyev V.V. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Combustion engines]. Chelyabinsk, Izd-vo YuUrGU Publ., 2006. 382 p. (In Russ.).
[5] Boloev P.A., Bodyakina T.V., Gergenova T.P. et al. Simulation of alternative fuel combustion process in internal combustion engines. *Traktory i selkhozma*shiny [Tractors and Agricultural Machinery], 2024, vol. 91, no. 1, pp. 5–12, doi: https://doi.org/10.17816/0321-4443-322839 (in Russ.).
[6] Markov V.A., Devyanin S.N., Boven Sa et al. Investigation of diesel engine operation on mixed biofuels and emulsified biofuels with rapeseed oil additives. *Dvigatelestroenie* [Engines Construction], 2023, no. 1, pp. 70–90. (In Russ.).
[7] Pavlov D.A., Korolev V.V. [Features of modeling the workflow of engines operating on alternative fuels in the structure of the measuring complex]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam*. T. 1 [International Conference on Soft Computing and Measurement. Vol. 1]. Sankt-Peterburg, SPbGETU LETI Publ., 2020, pp. 293–295. (In Russ.).

[8] Ivashkevich O.A., Kukharenok G.M., Petruchenko A.N. et al. Analysis of diesel operational process while using bio-fuel. *Vestnik BNTU*, 2007, no. 6, pp. 71–76. (In Russ.).
[9] Markov V.A., Chaynov N.D., Loboda S.S. Physicochemical properties of mixture diesel biofuels with vegetable oil additives and their flammability. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2018, no. 4, pp. 115–128, doi: http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2018-4-115-128 (in Russ.).
[10] Ristori A., Dagaut P., Pengloan G. et al. The oxidation of n-Hexadecane: experimental and detailed kinetic modeling. *Combust. Flame*, 2001, vol. 125, no. 3, pp. 1128–1137, doi: https://doi.org/10.1016/S0010-2180(01)00232-2
[11] Seshadri K., Lu T., Liebe D.M. On the estimation and validation of global single-step kinetics parameters of ethanol-air oxidation using diffusion flame extinction data. *Combust. Sci. Technol.*, 2010, vol. 183, no. 1, pp. 43–50, doi: https://doi.org/10.1080/00102202.2010.497516
[12] Westbrook C.K., Dryer F.L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames. *Combust. Sci. Technol.*, 1981, vol. 27, no. 1–2, pp. 31–43, doi: https://doi.org/10.1080/00102208108946970
[13] Zhang X., Li Y., Wang J. et. al. Reaction mechanism of pyrolysis and combustion of methyl oleate: a reaxff-MD analysis. *Energies*, 2024, vol. 17, no. 14, art. 3536, doi: https://doi.org/10.3390/en17143536
[14] Hexadecane. *webbook.nist.gov: website*. URL: https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C544763&Mask=2 (accessed: 05.10.2025).
[15] Oleic acid. *pubchem.ncbi.nlm.nih.gov: website*. URL: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Oleic-Acid (accessed: 05.10.2025).
[16] Standard enthalpy of formation, Gibbs energy of formation, entropy and molar heat capacity of organic substances. *engineeringtoolbox.com: website*. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/standard-enthalpy-formation-value-Gibbs-free-energy-entropy-heat-capacity-organic-d_1979.html (accessed: 05.10.2025).
[17] Standard thermodynamic properties of chemical substances. *sciencemadness.org: website*. URL: https://www.sciencemadness.org/whisper/files.php?pid=302004&aid=26533 (accessed: 05.10.2025).

Статья поступила в редакцию 13.01.2026

Информация об авторах

ПЛОТНИКОВ Сергей Александрович — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения». ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Киров, Российская Федерация, ул. Московская, д. 36, e-mail: plotnikovsa@bk.ru).

МАСАЛИМОВ Алексей Валерьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры математики и естествознания. Новотроицкий филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (426359, Новотроицк, Оренбургская обл., Российская Федерация, ул. Фрунзе, д. 8, e-mail: a.v.masalimov@yandex.ru).

Information about the authors

PLOTNIKOV Sergey Alexandrovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering Technology. Vyatka State University (610000, Kirov, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 36, e-mail: plotikovsa@bk.ru).

MASALIMOV Alexey Valerievich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mathematics and Natural Science. National University of Science and Technology «MISIS» (426359, Novotroitsk, Orenburg region, Russian Federation, Frunze str., Bldg. 8, e-mail: a.v.masalimov@yandex.ru).

МАЛЫШКИН Павел Юрьевич — кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания». Белорусский национальный технический университет (220013, Минск, Республика Беларусь, пр-т Независимости, д. 65, e-mail: pavelm36@yandex.by).

ОШМАРИН Алексей Александрович — аспирант кафедры «Технология машиностроения». ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Киров, Российская Федерация, ул. Московская, д. 36, e-mail: aleshikk89@mail.ru).

СТАРОДУМОВ Михаил Александрович — аспирант кафедры «Технология машиностроения». ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Киров, Российская Федерация, ул. Московская, д. 36, e-mail: starodumov_99@mail.ru).

MALYSHKIN Pavel Yuryevich — Candidate of Science (Eng.), Head of the Department of Internal Combustion Engines. Belarusian National Technical University (220013, Minsk, Republic of Belarus, Nezavisimosti Ave., Bldg. 65, e-mail: pavelm36@yandex.by).

OSHMARIN Alexey Alexandrovich — Postgraduate, Department of Mechanical Engineering Technology. Vyatka State University (610000, Kirov, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 36, e-mail: aleshikk89@mail.ru).

STARODUMOV Mikhail Alexandrovich — Postgraduate, Department of Mechanical Engineering Technology. Vyatka State University (610000, Kirov, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 36, e-mail: starodumov_99@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:
Плотников С.А., Масалимов А.В., Малышкин П.Ю., Ошмарин А.А., Стародумов М.А. Физико-химический анализ и моделирование процессов горения смесевых топлив в дизельном двигателе. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 11, с. 143–151.

Please cite this article in English as:
Plotnikov S.A., Masalimov A.V., Malyshkin P.Yu., Oshmarin A.A., Starodumov M.A. Physicochemical analysis and modeling of combustion processes of mixed fuels in a diesel engine. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 11, pp. 143–151.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие

«Физическая химия»

Авторы: А.Л. Петелин, А.А. Новиков

Представлено краткое изложение курса физической химии, традиционно читаемого в технических университетах. Кроме теоретического материала в пособие включены примеры конкретных задач с решениями для лучшего освоения практических приемов использования теории.

Для бакалавров и специалистов, обучающихся по направлениям «Материаловедение и технология материалов» (22.03.01), «Ядерные реакторы и материалы» (14.05.01), а также для слушателей программы обучения «Материаловедение и технология материалов».

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; https://press.bmstu.ru