

УДК 621.43.057

DOI: 10.17816/0321-4443-100880

Оригинальное исследование



Исследование процесса сгорания активированного топлива в автотракторном дизеле

С.А. Плотников¹, М.В. Мотовилова¹, А.Н. Карташевич²¹ Вятский государственный университет, Киров, Россия² Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки, Могилевская область, Республика Беларусь

Введение. С интенсивностью развития транспортной сферы и расширением парка тракторов и автомобилей, а также с ужесточением норм и требований в области эмиссии отработавших газов к процессу сгорания предъявляются повышенные требования. Данную проблему возможно решить при улучшении рабочего процесса в двигателе при помощи предварительного подогрева топлива до 300 °С в системе топливоподачи высокого давления. При внешнем тепловом воздействии улучшаются условия смесеобразования, наблюдаются увеличение скорости предпламенных реакций и положительное изменение динамики процесса сгорания. С увеличением потенциальной энергии углеводородных молекул в системе активированного комплекса происходит перераспределение энергии среди активных молекул. При этом коэффициент скорости химической реакции увеличивается из-за концентрации очагов углеводородных молекул, достигших энергетического барьера.

Объектом исследования является процесс сгорания дизельного топлива с предварительным внешним на него воздействием.

Цель — исследование и анализ процесса сгорания в автотракторном дизеле при активации топлива. Разработка схемы отдельных фаз процесса сгорания активированного дизельного топлива от температуры его подогрева.

Методы исследования — теоретическое исследование и анализ процесса сгорания предварительно термически подготовленного топлива для автотракторного дизельного двигателя. Теоретическое определение зависимости скорости образования и концентрации токсичных компонентов и дисперсных частиц при эмиссии в отработавших газах от константы скорости прямых и обратных химических реакций, а также от температуры активации топлива.

Результаты. Действительный коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси при активации дизельного топлива увеличивается. Скорость образования суммарных оксидов азота и углеводородов увеличивается на 1,79%, и 3,66%. Доля не сгоревшего углерода в процессе сгорания на активированном топливе изменяется в пределах $\pm (2...4) \%$.

Выводы. Теоретически разработана схема изменения отдельных фаз процесса сгорания активированного топлива по времени и температуре. Подогрев топлива ускоряет предпламенную подготовку в жидкой фазе, сокращается длительность фазы быстрого горения. Концентрация токсических показателей зависит от константы скорости химической реакции и температуры активации топлива.

Ключевые слова: процесс сгорания; константа скорости химической реакции; токсические показатели; активированное топливо

Для цитирования:

Плотников С.А., Мотовилова М.В., Карташевич А.Н. Исследование процесса сгорания активированного топлива в автотракторном дизеле // *Тракторы и сельхозмашины*. 2022. Т. 89, № 1. С. 31–41. DOI: 10.17816/0321-4443-100880

DOI: 10.17816/0321-4443-100880

Original study

Investigation of the combustion process of activated fuel in an automotive diesel engine

Sergey A. Plotnikov¹, Marina V. Motovilova¹, Anatoliy N. Kartashevich²¹ Vyatka State University, Kirov, Russia² Belarussian State Agricultural Academy, Gorki, Mogilev region, Republic of Belarus

BACKGROUND: Intensive development of the transport sphere and the extension of the fleet of tractors and cars, as well as the tightening of standards and requirements in the field of exhaust gas emissions have resulted in increased requirements for the combustion process. This problem can be solved by improving the working process in the engine by preheating the fuel to 300 °C in the high pressure fuel supply system. Under external thermal influence, the conditions of mixture formation are improved, an increase in the rate of preflame reactions and a positive change in the dynamics of the combustion process are observed. When potential energy of hydrocarbon molecules increases in the activated complex system, energy is redistributed among active molecules. Along with this, the rate coefficient of a chemical reaction increases due to the concentration of foci of hydrocarbon molecules that have reached the energy barrier.

The object of research is the process of diesel fuel combustion at preliminary external influence on it.

AIMS: The aim is to study the combustion process of a motor-tractor diesel engine upon fuel activation. Development of a scheme of individual phases of the activated diesel fuel combustion of depending on the temperature at heating.

METHODS: Theoretical study and analysis of the combustion process of thermally preprepared fuel for an automotive diesel engine. Theoretical determination of the dependence of the rate of formation and concentration of toxic components and dispersed particles on the rate constant of direct and reverse chemical reactions, as well as on the activation temperature of fuel at emission in exhaust gases.

RESULTS: The actual coefficient of molecular change of the working mixture increases when diesel fuel is activated. The rate of formation of total nitrogen oxides and hydrocarbons increases by 1.79% and 3.66%. The proportion of unburned carbon in the combustion process on activated fuel varies within $\pm (2...4)$ %.

CONCLUSIONS: Theoretically, a scheme for changing individual phases of the activated fuel combustion process by time and temperature has been developed. Fuel heating accelerates the pre-flame preparation in the liquid phase, shortens the duration of the rapid gorenje phase. The concentration of toxic indicators depends on the constant of the chemical reaction rate and the activation temperature of the fuel.

Keywords: combustion process; chemical reaction rate constant; toxic indicators; activated fuel

Cite as:

Plotnikov SA, Motovilova MV, Kartashevich AN. Studying the activated fuel combustion in an automotive diesel engine. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(1):31–41. DOI: 10.17816/0321-4443-100880

ВВЕДЕНИЕ

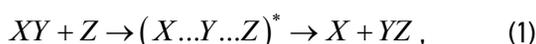
На современном этапе при использовании энергетических установок особое внимание уделяется вопросам их эффективной работы при эксплуатации, а также экономическим и экологическим показателям. Этот вопрос решается за счет совершенствования конструкции двигателя, улучшения рабочего процесса, дополнительного воздействия на топливо [1–7]. Одним из эффективных способов является предварительный подогрев дизельного топлива (ДТ) в топливопроводе высокого давления до температуры 300 °С непосредственно перед форсунками (рис. 1). Данное воздействие оказывает влияние на процесс сгорания в дизельном двигателе за счет изменения топливом своих физико-механических свойств, изменения процесса распыливания, смесеобразования и сгорания.



Рис. 1. Подогревательный элемент на линии высокого давления.

Fig. 1. Heating element on the high pressure line.

Процесс сгорания характеризуется быстрой химической реакцией окисления углеводородного топлива с появлением пламени и выделением теплоты. Согласно теории активированного переходного комплекса химической кинетики, схема химического взаимодействия веществ выглядит следующим образом (1):



где $XY + Z$ – исходные вещества химической реакции; $X + YZ$ – продукты химической реакции; $(X...Y...Z)^*$ – активированный комплекс в результате внешнего воздействия (переходное состояние системы химических элементов).

Так при активации ДТ до 300 °С потенциальная энергия углеводородных молекул в системе активированного комплекса оказывает влияние на уровень энергии, который соответствует величине энергетического барьера для химической реакции. Количество молекул, обладающих уровнем энергетического барьера, определяется законом (2) Максвелла – Больцмана:

$$N_e = N_o \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right), \quad (2)$$

где N_o – полное количество молекул в единице объема; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,314459$, Дж/(моль К); T – температура, К; E_a – энергия активации (равна энергии связи в молекуле), кДж/моль.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В Калининградском государственном техническом университете (КГТУ) проводились исследования топливоподачи и экономичности дизельного двигателя при подогреве топлива до 60 °С. По результатам работы представлены данные лабораторных испытаний и эксплуатационных проверок. Подогрев топлива в системе низкого давления улучшает качество горения топлива за счет уменьшения коэффициента поверхностного натяжения и интенсификации распыливания. Однако на больших нагрузках эффект от такого подогрева исчезает [6].

В совместной работе исследователей МГТУ им. Баумана (Россия) и Харбинского инженерного университета (Китай) использован сильный нагрев ДТ, который происходит при сжатии топлива и его прохождении через форсунку при сверхвысоких давлениях [17]. Предложенный способ подготовки обеспечивает нагрев топлива до 50...200 °С при давлениях до 200...400 МПа.

В совместной работе английских ученых выявлено повышение температуры многокомпонентного ДТ с увеличением давления от нагрева, вызванного трением и увеличением давления пара в форсунке. Получаемый эффект кавитации способствует лучшему распыливанию струи топлива, увеличению угла конусности распыливания, что влияет на смесеобразование и процесс сгорания углеводородного топлива [18].

В работе авторов Волжской государственной академии водного транспорта (г. Нижний Новгород) по улучшению характеристик двигателя путем термофорсирования топлива выявлены: уменьшение нагарообразования, выбросов вредных веществ с отработавшими газами, улучшение предварительной подготовки топлива, повышение КПД, увеличение полноты сгорания топлива. Перечисленные свойства возможны при изменении качества применяемого топлива с помощью присадок и его подогрева [4].

Авторами [1, 2, 3, 5, 7] экспериментально исследовались показатели работы дизеля с высоким термофорсированием ДТ. Проведенные стендовые испытания и полученные результаты подтвердили ранее сделанные предположения. Предварительный подогрев ДТ улучшает процесс сгорания, снижается осредненная температура цикла, удельный эффективный расход топлива до 3,5%, температура ОГ на 55 °С, что положительно

влияет на тепловыделение в цилиндре двигателя. Предложенное воздействие на топливо позволяет сократить период задержки воспламенения, ускорить начало тепловыделения.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Теоретическое исследование и анализ процесса сгорания активированного топлива, используемого в автотракторном дизеле. Разработка схемы отдельных фаз процесса сгорания активированного ДТ в зависимости от температуры его подогрева.

Теоретическое определение концентрации токсичных компонентов и дисперсных частиц в отработавших газах. Определение зависимости скорости их образования от константы скорости химических реакций углеводородного топлива при разных температурах его активации.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

С увеличением температуры в углеводородных соединениях происходит перераспределение энергии среди активных молекул. Скорость химической реакции увеличивается из-за концентрации очагов молекул, достигших энергетического барьера. Константа скорости химической реакции (3), (4) определяется законом Аррениуса [8, 9]:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right), \quad (3)$$

при этом:

$$k_0 = A \cdot \sqrt{T}, \quad (4)$$

где k_0 – коэффициент пропорциональности, характеризующий частоту столкновений всех реагирующих

молекул в единице объема; $\exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right)$ – доля

столкновений активных молекул, приводящих к химической реакции; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,314459$ Дж/(моль К).

Скорость химической реакции в жидкой фазе ДТ с повышением температуры топлива от предварительного воздействия увеличивается (5). Соотношение скоростей можно выразить следующим выражением:

$$v = \frac{W_{T_i}}{W_{T_o}} = \frac{\exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_i}\right)}{\exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_o}\right)}, \quad (5)$$

где v – соотношение скоростей реакции; T_o – температура подачи ДТ без воздействия, К; T_i – значение температуры ДТ (после подогрева на 100...300), К.

В результате преобразований выражение (5) можно записать в следующем виде (6):

$$v = k_e \frac{T_0 - T_i}{T_0 \cdot T_i}, \quad (6)$$

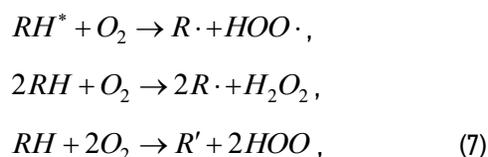
где $k_e = \frac{E}{R}$ – коэффициент активации в переходном комплексе химической реакции.

При мелкофракционной деструкции топливного факела появляются благоприятные условия для перехода молекул на уровень ранней энергии активации для протекания предпламенных химических реакций. Так как топливная капля движется в газовой постоянно изменяющейся среде с числом $R_e > 1000$, то по условиям, которые образуются вокруг капли и в самой капле, происходят колебания с изменением геометрических параметров топливной капли и ее физико-механических показателей. При этом в капле протекают интенсивные процессы тепло- и массообмена. В предпламенных реакциях скорость окисления углеводородных соединений в жидком состоянии увеличивается в 5–15 раз в зависимости от химической формулы и пространственной ориентации молекулы углеводородного соединения (таблица 1).

В газовой среде в результате испарения капли топлива присутствуют продукты окисления в форме гидропероксидов и альдегидов, которые поддерживают химические реакции разветвления цепей. Эти соединения являются инициаторами реакции самовоспламенения при более низких значениях температуры воспламенения [10].

Переход углеводородной молекулы в возбужденное состояние и механизм зарождения цепных реакций при окислении жидких углеводородов с применением внешнего температурного воздействия на ДТ через стенки топливопровода высокого давления (за счет наведения токов Фуко) реализуются при температуре топлива от 200–300 °С с повышенной скоростью. Данная температура не влияет на частоту внутримолекулярных и межмолекулярных колебаний в жидкой фазе, но оказывает воздействие на образование ассоциатов, которые содержат возбужденную молекулу, и на перемещение ассоциатов в локальном объеме топливного факела.

Зарождение цепей между предварительно возбужденными молекулами в жидкофазном топливе можно представить в виде окисления углеводородов по уравнениям (7) [10]:



где $R' - RCH \rightarrow CH_2$.

Таблица 1. Константа скорости химической реакции

Table 1. Chemical reaction rate constant

Углеводород	U_{max} , кДж/моль	Скорость реакции окисления		
		100 °С	200 °С	300 °С
Метан	8,44	1,6419	3,2971	5,2863
Этан	16,99	2,5222	9,0973	21,3475
Пропан	22,13	3,6447	16,7452	49,4049
н-Бутан	29,33	4,6862	39,3611	160,0459
н-Пентан	36,11	6,5866	88,022	484,1068
н-Гексан	44,35	9,9615	234,089	1858,45
2-Метилпропан	25,61	3,8880	25,3100	87,1965
2-Метилбутан	32,84	5,5894	59,7065	283,8577
2-Метилпентан	39,25	7,7113	127,7806	808,2855
2-Метилгексан	41,59	8,6725	168,693	1184,32
Циклопропан	23,89	10,4114	259,8644	2145,56
Циклобутан	31,00	3,5663	20,6359	65,8495
Циклопентан	32,30	5,0962	47,9909	210,2065
Циклогексан	36,11	7,9232	136,2395	882,7757

При высокотемпературном воздействии на ДТ (свыше 200 °С) зарождение цепей химических реакций происходит по гетерогенному механизму с более высокой энергией активации молекул, необходимой для преодоления энергетического барьера. Образующиеся свободные радикалы не стабильны и подвергаются разложению до того момента, как произойдет реакция их

с углеводородами [10]. Данный вид реакции можно представить уравнениями (8) в следующем виде:

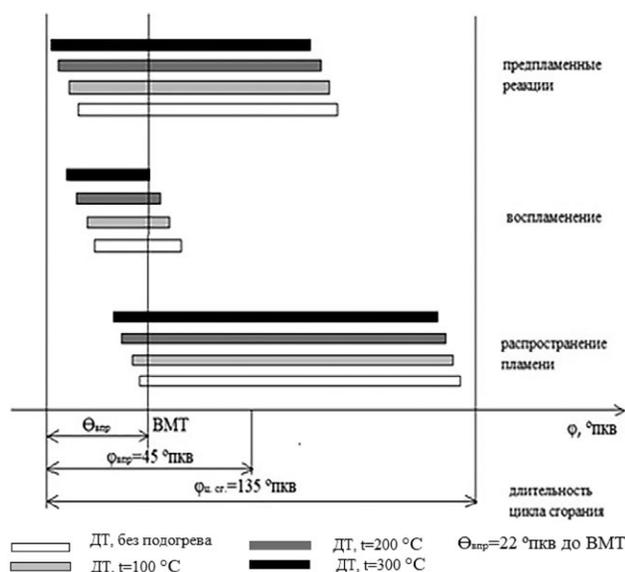
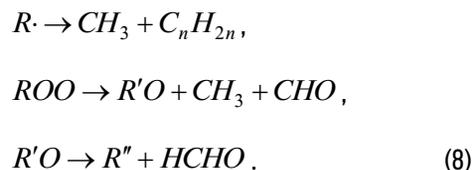


Рис. 2. Схема отдельных фаз процесса сгорания ДТ.

Fig. 2. Scheme of individual phases change of diesel fuel combustion.

Процесс сгорания развивается в турбулентном потоке с накоплением в газовой смеси активных промежуточных и основных продуктов окисления. На рис. 2 представлена схема отдельных фаз процесса сгорания ДТ с предварительным подогревом топлива от 100 °С до 300 °С, а также без подогрева. Отдельные фазы процесса горения перекрывают друг друга и протекают совместно. Соотношение и продолжительность стадий процесса горения зависят от особенностей физико-механических свойств подогретого дизельного топлива, его фракционного состава и смесеобразования.

Показатели процесса сгорания определяются при помощи датчика динамического давления PS – 01 (монтируется в камеру сгорания с дополнительной системой охлаждения) и индуктивного датчика (отметчик положения поршня в цилиндре двигателя в положении ВМТ) (рис. 3).

Полученные сигналы через преобразователь – усилитель AQ 02–001 – поступают в модуль сбора информации и обрабатываются с помощью программного обеспечения *National Instrument*, результаты

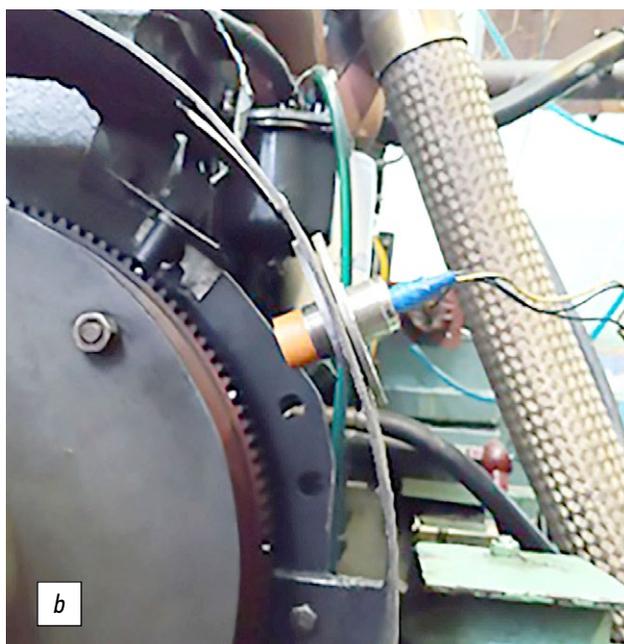
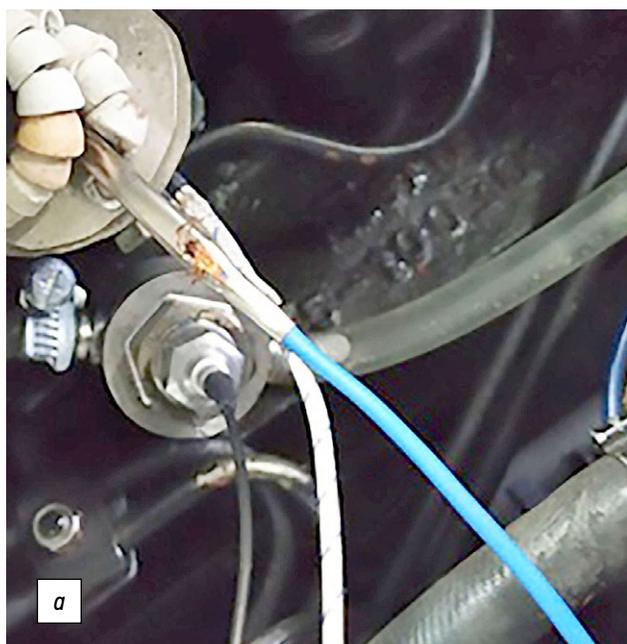


Рис. 3. Положение датчика PS – 01 (а) и датчика отметчика ВМТ (b).

Fig. 3. Position of a PS-01 sensor (a) and a speed sensor TDC (b).

выводятся на экран монитора в форме графика и в таблицы (рис. 4).

Полное время сгорания определяется по известному выражению (9):

$$\tau_{\text{сг}} = \tau_{\text{см}} + \tau_{\text{наг}} + \tau_{\text{х.р.}}, \quad (9)$$

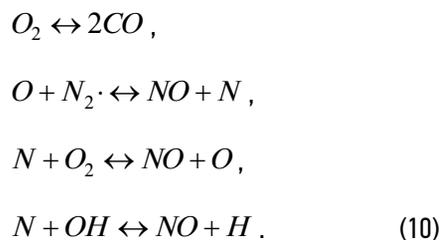
где $\tau_{\text{см}}$ – время смесеобразования, с; $\tau_{\text{наг}}$ – время нагрева топливовоздушной смеси до температуры воспламенения, с; $\tau_{\text{х.р.}}$ – время химической реакции, с.

Время сгорания подогретого ДТ уменьшается согласно выражению (9), но время пребывания в камере сгорания до срабатывания газораспределительного

механизма остается прежним. Данное обстоятельство способствует более полному окислению углеводородных соединений.

В современных условиях при эксплуатации двигателя особое внимание уделяется газообразным компонентам и дисперсным частицам в отработавших газах. Оксид азота формируется во время горения в различных концентрациях во всех зонах камеры сгорания и зависит от локальной температуры и концентрации кислорода.

Образование оксида азота происходит при диссоциации молекул кислорода и водорода на атомы при высокой температуре пламени по обратимым цепным реакциям [11] по известным выражениям (10):



Обратная реакция имеет большую энергию активации из-за сильной тройной связи в молекуле азота. Скорость образования оксида азота больше в богатых смесях, чем в бедных, а наибольшая концентрация образуется в зонах с бедной смесью [11].

Скорость образования NO и N зависит от константы скорости прямых и обратных химических реакций, которые могут быть определены из выражений (11), (12):



Рис. 4. Система для индицирования в сборе.

Fig. 4. Complete display system.

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_{v1}[O][N_2] + k_{v2}[N][O_2] + k_{v3}[N][OH] - k_{r1}[NO][N] - k_{r2}[NO][O] - k_{r3}[NO][H], \quad (11)$$

где k_{v1} , k_{v2} , k_{v3} – константы скорости прямых реакций;

$$\frac{d[N]}{dt} = k_{v1}[O][N_2] - k_{v2}[N][O_2] - k_{v3}[N][OH] - k_{r1}[NO][N] + k_{r2}[NO][O] + k_{r3}[NO][H], \quad (12)$$

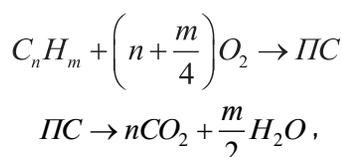
где k_{r1} , k_{r2} , k_{r3} – константы скорости обратных реакций.

При условии квазистационарности атомов азота скорость образования NO_x будет равной (13):

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{v1}[O][N_2]. \quad (13)$$

Уменьшение $[NO]$ в отработавших газах возможно за счет уменьшения температуры цикла или концентрации $[N][O_2]$. Скорость образования $[NO_x]$ представлена в таблице 2 в зависимости от температуры активированного топлива.

Несгоревшие углеводороды образуются в зонах камеры сгорания, которые были частично охвачены в процессе горения. Активированное ДТ позволяет сократить процесс прогрева впрыскиваемого топлива, быстро диффундировать с воздушным зарядом и при температуре топлива 250–300 °С вступать в реакцию с образованием альдегидов и перекисей. Уравнения химической реакции перед воспламенением можно записать в виде [11, 12]:



где PC – промежуточные соединения.

При дальнейшем увеличении температуры в камере сгорания в процессе окисления альдегида переходят в форму простых углеводов, но при этом теряют группу CH_2 алькильного радикала. Активный радикал группы CH_2 окисляется до оксида углерода и воды. В условиях богатой смеси и при недостаточном поступлении кислорода возможно образование ароматических полициклических углеводов.

Скорость образования можно определить из выражения (14) [13]:

$$\frac{d[CH]}{d\tau} = -C_R A [CH][O_2] \exp\left[-\frac{E}{R \cdot T}\right], \quad (14)$$

где E – энергия активации, Дж/моль; C_R – безразмерный коэффициент, обеспечивающий удовлетворительное согласование с опытными данными; A – предэкспоненциальный множитель.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Скорость образования углеводов в зависимости от температуры активированного топлива представлена в таблице 2.

Максимальное образование частиц сажи наблюдается в фазе диффузионного горения в результате процесса пиролиза и окислительного крекинга в зонах богатой смеси, высокой температуры и при недостатке атомарного кислорода, в фазе замедленного диффузионного горения при поступлении последних капель ДТ из распылительного сопла форсунки, которые встречают на своем пути уже не воздушный заряд, а продукты сгорания ранее распыленных углеводов [14].

Термическое воздействие на топливо приводит к изменению характеристик топливного факела, при этом средний диаметр капель ДТ при впрыске по Заутеру, (d_{32}) уменьшается до 7,61 мкм. Это ведет к деструкции топливного факела ближе к сопловым отверстиям и способствует локальной концентрации капель

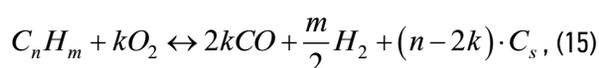
Таблица 2. Скорость образования токсических показателей в отработавших газах

Table 2. Rate of toxic indicators formation in exhaust gases

№, п/п	Наименование показателя	Формула реакции	Температура активированного топлива, °С		
			100	200	300
1	Константа скорости реакции	$k_{v1(NO)}$, см ³ /моль с	$1,6241 \cdot 10^{14}$	$1,6598 \cdot 10^{14}$	$1,6835 \cdot 10^{14}$
2	Константа скорости реакции	$k_{v2(NO)}$, см ³ /моль с	$8,9217 \cdot 10^9$	$8,9388 \cdot 10^9$	$8,9487 \cdot 10^9$
3	Константа скорости реакции	$k_{v3(NO)}$, см ³ /моль с	$2,8 \cdot 10^{13}$	$2,8 \cdot 10^{13}$	$2,8 \cdot 10^{13}$
4	Скорость образования	NO_x	$242,3575 \cdot 10^{14}$	$247,6849 \cdot 10^{14}$	$251,2215 \cdot 10^{14}$
5	Константа скорости реакции	$k_{v1(CH)}$, см ³ /моль с	$3,185 \cdot 10^{21}$	$3,2193 \cdot 10^{21}$	$3,2491 \cdot 10^{21}$
6	Скорость образования	CH	$506,8124 \cdot 10^{20}$	$512,2951 \cdot 10^{20}$	$515,8371 \cdot 10^{20}$

непосредственно около сопла форсунки. В данном случае основную роль играют кинетические, а не химические процессы. Увеличивающаяся скорость тепло- и массопереноса приводит к переобогащению смеси вблизи сопловых отверстий, так как перемешивание в этой зоне не такое интенсивное, как у стенок камеры сгорания [11]. Образование таких зон с богатой смесью и высокими локальными температурами способствует пиролизу молекул, которые образуют ацетилен и водород. Результат этой реакции – выделение твердого углерода [14].

Окисление углеводородов в условиях богатой смеси можно представить следующим выражением (15) [8]:



где C_s – твердый углерод.

Окисление твердого углерода зависит от температуры, времени его пребывания в камере сгорания, концентрации атомарного кислорода вокруг частиц сажи для преобразования его в соединение CO.

Долю несгоревшего углерода можно определить из выражения [15]:

$$\varphi_c = 1 - \frac{\beta_T CO_2^C}{0.21 - (CO_2^C + O_2^C)},$$

где β_T – коэффициент, характеризующий топливо

по элементарному составу, $\beta_T = 2.37 - \frac{H - O}{C}$; – объ-

емная доля оксида углерода в сухом эквиваленте; O_2^C – объемная доля кислорода в сухом эквиваленте.

Объемные доли отдельных компонентов, образующиеся в процессе сгорания (16, 17), в пересчете на сухие продукты выражаются через коэффициенты β_T и α [15]:

$$CO_2^C = \frac{M_{CO_2}}{M_C} = \frac{0.21 \cdot 0.79}{\alpha(0.79 + \beta) - 0.21\beta_T}, \quad (16)$$

где M_C – количество сухих компонентов при сгорании;

$$O_2^C = \frac{M_{CO_2}}{M_C} = \frac{0.21 \cdot (\alpha) \cdot (0.79 + \beta_T)}{\alpha(0.79 + \beta_T) - 0.21\beta_T}. \quad (17)$$

В таблице 3 представлено образование сажи в процессе сгорания активированного дизельного топлива при температуре от 100 °С до 300 °С.

В процессе сгорания жидкого топлива в ДВС изменение количества молей газов при сгорании

Таблица 3. Формирование несгоревшего углерода в ОГ

Table 3. Formation of unburned carbon in exhaust gases

№ п/п	Температура подогрева ДТ, °С	Коэффициент характеристики топлива, β	Объемная доля, CO_2^C	Объемная доля, O_2^C	Доля не сгоревшего углерода, φ_c
1	ДТ (БП)	2,37	0,0852	0,0967	0,01
2	100 °С	2,37	0,0852 \pm 0,0003	0,0967 \pm 0,00038	0,01 \pm 0,0004
3	200 °С	2,37	0,0852 \pm 0,0009	0,0967 \pm 0,0010	0,01 \pm 0,0011
4	300 °С	2,37	0,0852 \pm 0,0015	0,0967 \pm 0,0017	0,01 \pm 0,0018

Таблица 4. Формирование токсических показателей в ОГ

Table 4. Formation of toxic indicators in exhaust gases

№ п/п	Температура подогрева ДТ, °С	Изменение объема количества молей ΔM , кг моль/кг топлива	Коэффициент (теор.) молекулярного изменения рабочей смеси, i_0	Действительный коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси, i	Компоненты, образующие отработавшие газы			
					M_{CO_2} , кмоль/кг топлива	M_{H_2O} , кмоль/кг топлива	M_{O_2} , кмоль/кг топлива	M_{N_2} , кмоль/кг топлива
1	ДТ (БП)	0,0586	1,0301	1,0290	0,07	0,18	0,23	1,05
2	100 °С	0,0588	1,0301	1,0331	0,07 \pm 0,00028	0,18 \pm 0,00072	0,23 \pm 0,00092	1,05 \pm 0,0042
3	200 °С	0,0592	1,0301	1,0403	0,07 \pm 0,00077	0,18 \pm 0,00198	0,23 \pm 0,00253	1,05 \pm 0,0116
4	300 °С	0,05998	1,0301	1,0475	0,07 \pm 0,00126	0,18 \pm 0,00324	0,23 \pm 0,00414	1,05 \pm 0,0189

определяется разностью количества кмолей продуктов сгорания и кмолей (18) смеси (свежего заряда) [16]:

$$\Delta M = M_2 - M_1 = \frac{H + \frac{O}{8}}{4}, \quad (18)$$

где M_2 – количество молей продуктов неполного сгорания ДТ, кмоль пр. сг./кг топлива; ΔM – изменение объема количества кмолей; M_1 – количество молей горючей смеси, кмоль см/кг топлива; H – массовая доля содержания водорода в 1 кг топлива; O – массовая доля содержания кислорода в 1 кг топлива.

При предварительном подогреве ДТ до 300 °С увеличивается скорость химических реакций, то есть увеличивается количество прореагировавших углеводородных соединений в единицу времени.

$$\Delta M < \Delta M_t,$$

где ΔM – изменение объема количества кмолей ДТ без подогрева; ΔM_t – изменение объема количества кмолей с подогревом ДТ.

Тогда выражение (18) можно представить в следующем виде (19):

$$\Delta M = \frac{H + \frac{O}{8}}{4} k_{x.p.}, \quad (19)$$

где $k_{x.p.}$ – поправочный коэффициент, учитывающий увеличение скорости химической реакции при активации топлива.

В таблице 4 представлены зависимости образования компонентов химических соединений активированного топлива до 300 °С при неполном сгорании дизельного топлива. Образование сажи не влияет на показатели ΔM и i_0 , так как соединение водорода и оксида углерода практически полностью окисляется в двигателях с внутренним смесеобразованием. Значение φ_c повышается с увеличением нагрузки двигателя и при выборе режима работы силовой установки.

ВЫВОДЫ

1. При мелкофракционной деструкции топливного факела появляются благоприятные условия для перехода молекул на уровень ранней энергии активации для протекания предпламенных химических реакций, влияющих на процесс сгорания.
2. Предложена сравнительная схема отдельных фаз процесса сгорания ДТ во времени с подогревом топлива до температур 100 °С, 200 °С и 300 °С в зависимости от константы скорости химической реакции и без подогрева ДТ. Константа скорости химической реакции увеличивается в 5–15 раз. Подогрев топли-

ва ускоряет предпламенную подготовку в жидкой фазе, сокращается длительность фазы быстрого горения.

3. Действительный коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси при активации ДТ увеличивается с 1,0301 кмолей до 1,0475 кмолей. Скорость образования оксидов азота NO_x увеличивается с $242,3575 \times 10^{14}$ (см³/моль с) до $251,2215 \times 10^{14}$ (см³/моль с), C_xH_y увеличивается с $506,8124 \times 10^{20}$ (см³/моль с) до $515,8371 \times 10^{20}$ (см³/моль с).
4. Уменьшение концентрации оксида азота в отработавших газах возможно за счет уменьшения температуры цикла или концентрации атомарного азота и молекулярного кислорода, а CH за счет уменьшения концентрации углеводородной группы и молекулярного кислорода.

Доля несгоревшего углерода в процессе сгорания на активированном топливе изменяется в пределах $\pm(2...4)\%$.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. С.А. Плотников – постановка задач исследования, теоретическая разработка проблемы, утверждение финальной версии; А.Н. Карташевич – подготовка методической и приборной базы исследований, экспертная оценка материала; М.В. Мотовилова – проведение практического эксперимента, написание текста рукописи.

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследований и подготовку статьи).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследований.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contribution. S.A. Plotnikov contributed to the research design and implementation, developed the theory of the issue, approved the final version of the manuscript. A.N. Kartashevich prepared the methodology and equipment base for research, evaluated of the data. M.V. Motovilova carried out the experiment, wrote and edited a manuscript. All authors certify that they meet the ICMJE international criteria for authorship.

Competing interests. The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

Funding source. Authors state that this research was not supported by any external sources of funding.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плотников С.А., Бузииков Ш.В., Атаманюк В.Ф. Анализ способов снижения периода задержки воспламенения // Развитие транспорта в регионах России: проблемы и перспективы: материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: филиал ФГБОУ ВО МГИУ, 2012. С. 6–9.
2. Плотников С.А., Бузииков Ш.В., Бирюков А.Л. Анализ процесса сгорания и тепловыделения тракторного дизеля с предварительной термической подготовкой топлива // Молочнохозяйственный вестник. 2017. № 3(27). С. 114–124.
3. Плотников С.А., Бузииков Ш.В., Атаманюк В.Ф. Исследование процесса сгорания и тепловыделения дизеля с термофорсированием // Журнал «Тракторы и сельхозмашины». 2014. № 7. С. 25–27.
4. Храмов М.Ю., Садеков М.Х. Улучшение характеристик двигателя путем термофорсирования топлива // Вестник АГТУ. 2007. № 6(41). С. 83–86.
5. Плотников С.А., Бузииков Ш.В., Атаманюк В.Ф. Прогнозирование процессов воспламенения и сгорания нагретого топлива в дизеле // Проблемы интенсификации животноводства с учетом пространственной инфраструктуры сельского хозяйства и охраны окружающей среды. Фаленты-Варшава, 2012. С. 216–220.
6. Мартынова И.Б. Исследование особенностей топливоподачи и экономичности дизеля на долевых нагрузках при подогреве топлива: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Калининград: КГТУ, 1996. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15962651>. Дата обращения: 07.04.2022.
7. Плотников С.А. Улучшение эксплуатационных показателей дизелей путем создания новых альтернативных топлив и совершенствование топливоподающей аппаратуры: монография. Нижний Новгород: НГТУ, 2011.
8. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
9. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Часть II. Теория горения. Санкт Петербург: СПбГТУРП, 2011.
10. Братков А.А. Теоретические основы химмотологии. Москва: Химия, 1985.
11. Чигир Н.А., Вейнберг Р. Дж., Боумэн К.Т. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени / под ред. Ю.Ф. Дитякина. Москва: Машиностроение, 1981.
12. Лашко В.А., Привальцев И.Ю. Образование выбросов отработавших газов и управление процессов сгорания в поршневом двигателе // Ученые заметки ТОГУ. 2014. Том 5. № 1. С. 324–337. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21408727/>. Дата обращения: 07.04.2022.
13. Кавтарадзе З.Р. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
14. Ассад М.С., Пенязьков О.Г. Продукты сгорания жидких и газообразных топлив: образование, расчет, эксперимент. Минск: Беларуская наука, 2010.
15. Орлин А.С., Вырубов Д.Н., Калиш Г.Г. Двигатели внутреннего сгорания. Рабочие процессы в двигателях и их агрегатах. Москва: МАШГИЗ, 1957.
16. Николаенко А.В. Теория, конструкция и расчет автотракторных двигателей. Москва: Колос, 1984.
17. Zhao J., Grekhov L., Ma X., Denisov A. Specific features of diesel fuel supply under ultra-high pressure // Applied Thermal Engineering. 2020. N 179. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115699
18. Vidal A., Kolovos K., Gold M.R., et al. Preferential cavitation and friction-induced heating of multi-component Diesel fuel surrogates up to 450MPa // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. N 166. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120744

REFERENCES

1. Plotnikov SA, Buzikov ShV, Atamanyuk VF. Analiz sposobov snizheniya perioda zaderzhki vosplamneniya. In: *Razvitie transporta v regionakh Rossii: problemy i perspektivy: materialy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Kirov: filial FGBOU VO MGIU; 2012. P:6–9. (In Russ).
2. Plotnikov SA, Buzikov ShV, Biryukov AL. Analysis of combustion and heat release of a tractor diesel engine with pre-heat fuel treatment. *Molochnokhoyzaistvennyi vestnik*. 2017;(3):114–124. (In Russ).
3. Plotnikov SA, Buzikov ShV, Atamanyuk VF. Investigation of burning and heat generation in thermally forced diesel. *Zhurnal Traktory i sel'khoz mashiny*. 2014;(7):25–27. (In Russ).
4. Khramov MY, Sadekov MKh. The improvement of engine characteristics by means of thermal boosting. *Vestnik of astrakhan state technical university*. 2007;(6):83–86. (In Russ).
5. Plotnikov SA, Buzikov ShV, Atamanyuk VF. Prognozirovanie protsessov vosplamneniya i sgoraniya nagretogo topliva v dizele. In: *Problemy intensifikatsii zhivotnovodstva s uchetom prostranstvennoy infrastruktury sel'skogo khozyaistva i okhrany okruzhayushchei sredy*. Falenty-Varshava; 2012. P:216–220. (In Russ).
6. Martynova IB. Issledovanie osobennostei toplivopodachi i ekonomichnosti dizelya na dolevykh nagruzkakh pri podogreve topliva [dissertation]. Kaliningrad: KGTU, 1996. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15962651>. (In Russ).
7. Plotnikov SA. *Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazatelei dizelei putem sozdaniya novykh al'ternativnykh topliv i sovershenstvovanie toplivopodayushchei apparatury: monografiya*. Nizhny Novgorod: NGTU, 2011. (In Russ).
8. Varnatts Y, Maas U, Dibbl R. *Gorenie. Fizicheskie i khimicheskie aspekty, modelirovanie, eksperimenty, obrazovanie zagryaznyayushchikh veshchestv*. Moscow: FIZMATLIT; 2003. (In Russ).
9. Belousov VN, Smorodin SN, Smirnova OS. *Toplivo i teoriya goreniya. Chast' II. Teoriya goreniya*. Saint Petersburg: SPbGTURP; 2011. (In Russ).
10. Bratkov AA. *Teoreticheskie osnovy khimmotologii*. Moscow: Khimiya; 1985. (In Russ).
11. Chigir NA, Veinberg RJ, Boumen KT, et al. Pollution formation and destruction in flames. Dityakina YF editor. Moscow: Mashinostroenie; 1981. (In Russ).

12. Lashko VA, Privaltsev IY. Education exhaust emissions and control process combustion piston engine. *Uchenye zametki TOGU*. 2014;5(1):324-337. Available from <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21408727/>. (In Russ).

13. Kavtaradze ZR. *Teoriya porshnevyykh dvigatelei. Spetsial'nye glavy*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana; 2008. (In Russ).

14. Assad MS, Penyaz'kov OG. *Produkty sgoraniya zhidkikh i gazoobraznykh topliv: obrazovanie, raschet, eksperiment*. Minsk: Belaruskaya nauka; 2010. (In Russ).

15. Orlin AS, Vyubov DN, Kalish GG, et al. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Rabochie protsessy v dvigatelyakh i ikh agregatakh*. Moscow: MASHGIZ; 1957. (In Russ).

16. Nikolaenko AV. *Teoriya, konstruksiya i raschet avtotraktornykh dvigatelei*. Moscow: Kolos; 1984. (In Russ).

17. Zhao J, Grekhov L, Ma X, Denisov A. Specific features of diesel fuel supply under ultra-high pressure. *Applied Thermal Engineering*. 2020;(179). doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115699

18. Vidal A, Kolovos K, Gold MR, et al. Preferential cavitation and friction-induced heating of multi-component Diesel fuel surrogates up to 450MPa. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021;(166). doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120744

ОБ АВТОРАХ

*Плотников Сергей Александрович

профессор, д.т.н.

адрес: Россия, 610000, г. Киров, ул. Московская, д. 36

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>

eLibrary SPIN: 4899-9362

E-mail: Plotnikov@bk.ru

Мотовилова Марина Владимировна

аспирант

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6857-3126>

eLibrary SPIN: 2772-8893

E-mail: Marina_mtd@mail.ru

Карташевич Анатолий Николаевич

профессор, д.т.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3649-1521>

eLibrary SPIN: 8541-5330

E-mail: Kartashevich@yandex.ru

*Автор для переписки

AUTHORS INFO

*Sergey A. Plotnikov

Professor, Doctor of Engineering Sciences

address: Moskovskaya street, 36, Kirov, 610000, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>

eLibrary SPIN: 4899-9362

E-mail: Plotnikov@bk.ru

Marina V. Motovilova

graduate

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6857-3126>

eLibrary SPIN: 2772-8893

E-mail: Marina_mtd@mail.ru

Anatoliy N. Kartashevich

Professor, Doctor of Engineering Sciences

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3649-1521>

eLibrary SPIN: 8541-5330

E-mail: Kartashevich@yandex.ru

*Corresponding author