



DOI: 10.18721/JEST.25105
УДК 621.43

В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, А.Н. Козлов

Вятская государственная сельскохозяйственная академия, г. Киров, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ

Сажа – главная составляющая твердых частиц, содержащихся в отработавших газах дизелей; образуется из продуктов термического разложения углеводородного топлива. Предложена математическая модель для прогнозирования дымности отработавших газов дизелей на различных нагрузочных и скоростных режимах. По результатам численного моделирования получено текущее содержание компонентов газовой смеси в реакционной зоне в зависимости от угла поворота коленчатого вала и определены такие показатели сажесодержания в объеме цилиндра, как минимальный средний диаметр частиц, максимальная масса сажи, угол, соответствующий максимальному содержанию сажи, суммарная масса частиц сажи в цилиндре и суммарное сажевыделение. Проведены лабораторно-стендовые исследования дизеля 2Ч 10,5/12,0 с определением индикаторного давления, индикаторной температуры газов в цилиндре, скорости тепловыделения и показателей токсичности и дымности отработавших газов. Результаты моделирования дымности отработавших газов дизеля подтверждены экспериментальными измерениями на различных режимах работы.

Ключевые слова: сажа, дымность, дизель, отработавшие газы, тепловыделение.

Ссылка при цитировании:

В.А. Лиханов, О.П. Лопатин, А.Н. Козлов. Моделирование сажеобразования в цилиндре дизеля // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 47–59. DOI: 10.18721/JEST.25105.

V.A. Likhanov, O.P. Lopatin, A.N. Kozlov

Vyatka state agricultural academy, Kirov, Russia

MODELING SOOT FORMATION IN CYLINDER OF DIESEL ENGINE

Soot is the main component of the solid particles contained in exhaust gases of diesel engines, which is formed from the products of thermal decomposition of hydrocarbon fuel. A mathematical model for predicting the fluidity of exhaust gases of diesel engines at different load and speed modes of operation is proposed. The current content of the gas mixture components in the reaction zone, depending on the angle of rotation of the crankshaft, was obtained by numerical simulation. Such indicators of soot content in the cylinder volume as the minimum average diameter of the particles, the maximum soot mass, the angle of the maximum soot content, the total mass of soot particles in the cylinder and the total soot release were determined. Laboratory and bench studies of diesel 2F 10.5/12.0 have been carried out, determining indicator pressure, indicator temperature of the gases in the cylinder, heat release rate and indicators of toxicity and smoke exhaust gases. The results of simulation of smokiness of the diesel exhaust gases are confirmed by experimental measurements in different operating modes.

Keywords: soot, smoke, diesel, exhaust gases, heat generation.

Citation:

V.A. Likhanov, O.P. Lopatin, A.N. Kozlov, Modeling soot formation in cylinder of diesel engine, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 47–59, DOI: 10.18721/JEST.25105.

Введение

Дизель – широко используемый двигатель, поскольку имеет высокую эффективность преобразования топливной энергии. Истощение невозобновляемых ископаемых ресурсов и загрязнение воздуха, вызывающее негативные последствия для здоровья человека, – две проблемы, стоящие перед всеми странами. С развитием автомобилизации они стали ещё более серьезными. В мире проводится множество исследований, направленных на повышение эффективности работы двигателей внутреннего сгорания и снижение вредных выбросов [1, 2].

Сажа – главная составляющая твердых частиц, содержащихся в отработавших газах (ОГ) дизелей; она образуется из продуктов термического разложения углеводородного топлива. Мельчайшие частицы сажи долгое время могут находиться в воздухе, вызывая смог и ухудшая видимость. Твердые частицы создают широкий спектр пагубных последствий для здоровья человека. Они способны, проникая глубоко в легкие, вызывать респираторные и сердечно-сосудистые заболевания [3].

Хотя транспорт – ключевое звено в мировой экономике, он также является одним из основных факторов, влияющих на потребление энергии и выбросы загрязняющих веществ. Необходимо контролировать или ограничивать выбросы сажи для смягчения проблемы загрязнения, особенно в контексте двигателей внутреннего сгорания, применительно к которым законодательно ужесточаются правила по ограничению массы и количества частиц сажи. Это требует тщательного изучения процессов образования и горения частиц сажи в цилиндре дизеля. Поскольку процесс сажевыделения неразрывно связан с такими внутрицилиндровыми процессами, как тепловыделение, испарение и сгорание топлива, то для повышения точности численного моделирования необходимо совершенствовать знания об этих процессах [4, 5].

Методика и расчетные исследования

На базе кафедры тепловых двигателей автомобилей и тракторов проводились стендовые исследования дизеля 2Ч 10,5/12,0.

Основные характеристики и параметры режима работы этого дизеля следующие:

Тип дизеля	С воздушным охлаждением и полусферической камерой сгорания
Число цилиндров	2
Рабочий объем	2080 см ³
Номинальная частота вращения коленчатого вала	1800 мин ⁻¹
Диаметр поршня	10,5 см
Ход поршня	12,0 см
Степень сжатия	16,5
Установочный угол опережения впрыска топлива	30 град. до ВМТ
Номинальная мощность	18,4 кВт
Среднее эффективное давление	0,588 МПа
Удельный эффективный расход топлива	241,8 г/кВт·ч
Эффективный КПД	0,351

Двигатель, установленный на стенде, был оборудован датчиками давления PS-01 в цилиндре и положения маховика относительно верхней мертвой точки (ВМТ). Сигнал с датчиков через усилитель и аналогово-цифровой преобразователь La-2USB12 поступал на персональный компьютер. С помощью стандартных средств обработки циклического цифрового сигнала, реализованных в пакете базовых инженерных вычислительных программ, было выполнено наложение сигнала датчика давления в цилиндре дизеля (по соответствующим отметкам ВМТ) в многоцикловую матрицу [6].

По частоте дискретизации датчика определялась скорость вращения коленчатого вала дизеля в момент индицирования. Данные сопоставлялись с результатами измерения электронным цифровым тахометром ТЦ-1 во время стендовых испытаний. С помощью программного блока определялось максимальное значение функции давления в цилиндре (рис. 1) и его положение относительно ВМТ.

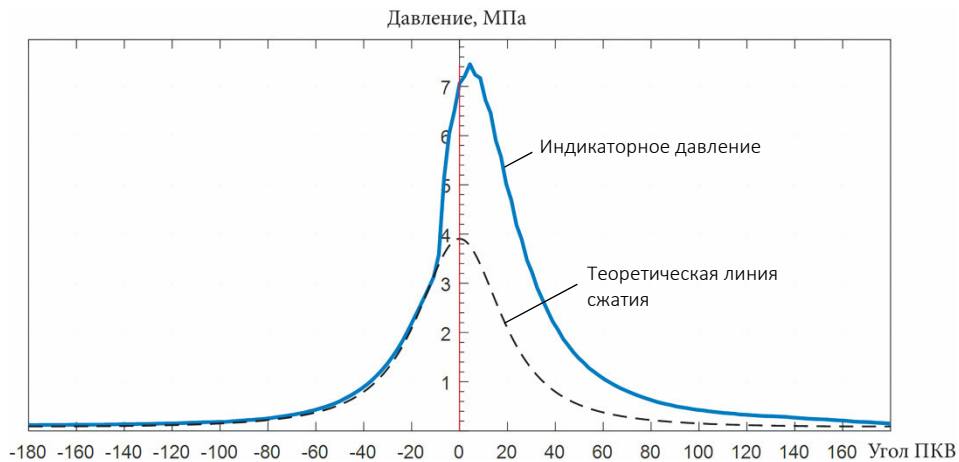


Рис. 1. Индикаторное давление в цилиндре дизеля 2Ч10,5/12,0 на номинальном режиме в зависимости от угла поворота коленчатого вала (ПКВ)

Fig. 1. Indicator pressure in the diesel cylinder 2F 10.5/12.0 at nominal mode depending on the angle of rotation of the crankshaft (RCS)

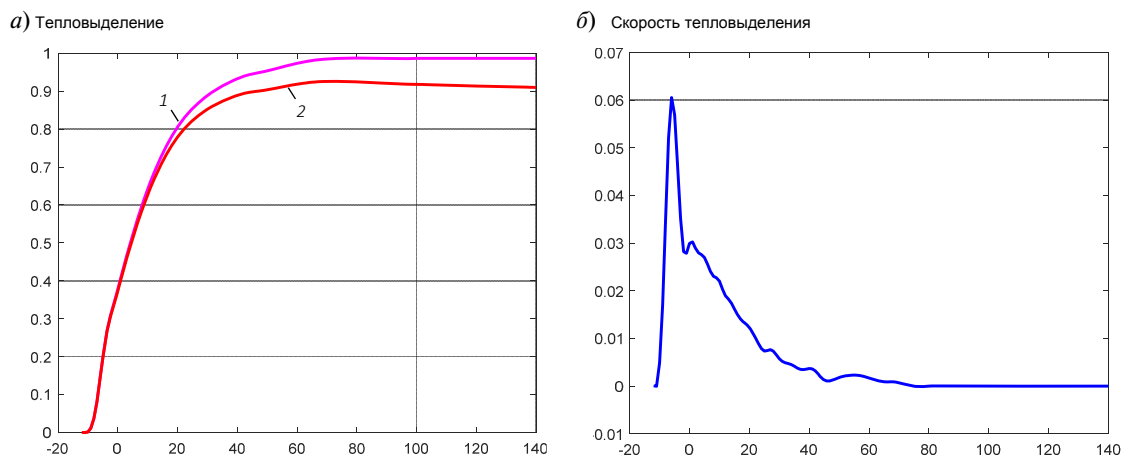


Рис. 2. Интегральная характеристика активного (1) и полного (2) тепловыделения (а) и дифференциальная характеристика тепловыделения в цилиндре дизеля (б)

Fig. 2. An integral characteristic of active (1) and complete (2) heat dissipation (a) and differential characteristics of heat generation in the cylinder of a diesel engine (b)

Расчет индикаторной температуры газов в цилиндре, скорости тепловыделения, скорости отвода тепла производился по методике ЦНИДИ. Исходными данными для расчета служили энергетическая характеристика, расход топлива и коэффициент избытка воздуха, измерение которого производилось с помощью счетчика РГ-250, установленного перед впускным коллектором дизеля, и электронно-

го цифрового тахометра ТЭМП-4. Расход топлива измерялся электронным расходомером топлива АИР-50 [7].

Вычисление интегральной и дифференциальной характеристик тепловыделения, индикаторной температуры газов в цилиндре и скорости отвода тепла производилось по алгоритмам, реализованным в отдельных подпрограммах. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

В точках пересечения дифференциальной характеристики и нулевой ординаты определены углы ПКВ, при которых начинается и заканчивается процесс сгорания. По результатам расчета конечное полное тепловыделение составило $X = 0,98$; активное тепловыделение в момент открытия выпускного клапана – $X_a = 0,91$. Угол начала сгорания составил 9,4 градуса ПКВ, а продолжительность сгорания – 84 градуса ПКВ. Период задержки воспламенения с учетом установочного угла начала подачи топлива (30 градусов ПКВ до ВМТ) составил 20,6 градуса. Скорость тепловыделения имеет два выраженных максимума, что соответствует современной теории процесса сгорания топлива в дизеле (рис. 2).

Для моделирования процессов образования сажи в цилиндре дизеля была использована двухзонная модель, согласно которой камера сгорания условно разбивалась на две зоны: образования сажи (глубокий пиролиз топлива) и выгорания. Геометрически зона выгорания сажи охватывает топливный факел снаружи, а зона образования сажи находится в высокотемпературных предпламенных участках с локальным коэффициентом избытка воздуха менее 0,7 (рис. 3) [8].

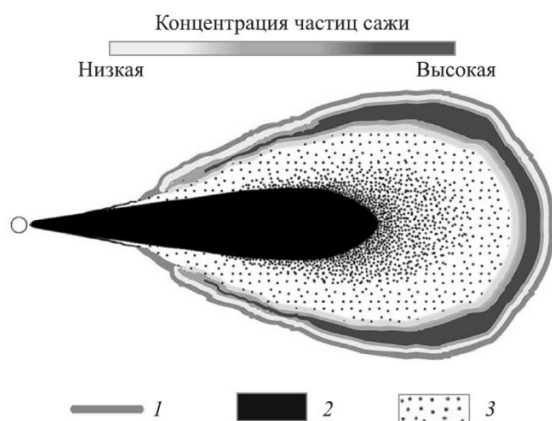


Рис. 3. Модель топливной струи: 1 – диффузионное пламя; 2 – жидкое топливо; 3 – пары топлива с каплями [9]

Fig. 3. Fuel jet model: 1 – diffusion flame; 2 – liquid fuel; 3 – fuel vapors with droplets [9]

В зоне пиролиза углеводородов топлива преимущественно происходил процесс нуклеации сажи и гетерогенный рост поверхности частиц. В зоне горения идут процессы коагуляции и газификации частиц сажи. Для каждой из зон определялся локальный газовый состав и осредненные температуры участков.

Изначально принято, что в зоне пиролиза топлива содержится некоторое количество остаточных газов, испаренное топливо и воздух, состоящий из кислорода, азота, углекислого газа и паров воды. Состав газов в зоне горения определялся по полуэмпирической модели Н.Ф. Разлейцева [10]. Текущее значение температуры T_v воздуха, не участвующего в сгорании топлива, рассчитывалось по уравнению адиабаты. Температура продуктов сгорания $T_{гс}$ определялась для каждого момента цикла из уравнения баланса энтальпий с учетом потерь теплоты на недогорание топлива и диссоциацию продуктов сгорания, а также радиационных тепловых потерь из зоны реакции. В качестве определяющей температуры процесса образования сажи была принята средняя интегральная температура фронта пламени, усредненная в диапазоне от температуры воздуха до температуры продуктов сгорания по константе скорости гетерогенного процесса поверхностного роста частиц сажи при линейном профиле температур по фронту пламени (рис. 4).

В предпламенной реакционной зоне частица сажи зарождается из молекулярных предшественников, среди которых ключевым является ацетилен. После зарождения частиц и возникновения твердой фазы начинается рост частиц за счет гетерогенных реакций и коалесценции частиц. Предложено несколько механизмов (вариантов) процесса гетерогенного роста массы дисперсного углерода. Наибольшее распространение получил механизм НАСА (HydrogenAbstractionCarbonAddition), хотя в литературе были предложены и другие пути, такие, как механизм винилдобавления водорода (HAVA), механизм роста через коньюгированные полиеновые радикалы, фенильный механизм и др.

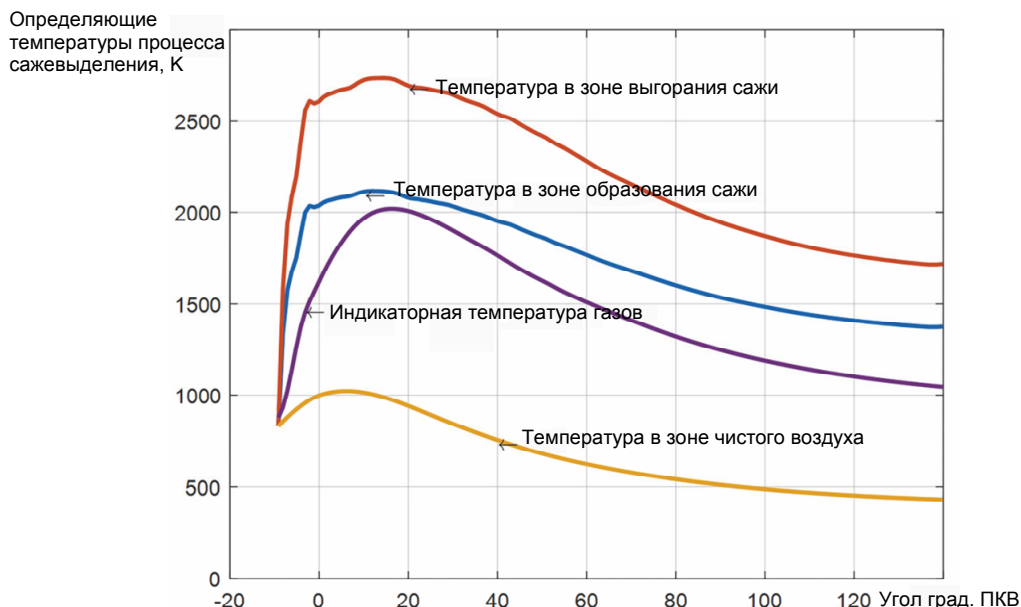


Рис. 4. Определяющие температуры процесса сажевыделения

Fig. 4. Determining the temperature of the process of soot

Маршрут механизма НАСА наиболее широко используется при моделировании образования сажи. Ключевую роль в кинетическом механизме играет ограниченное число компонентов (Н, O₂, C₂H₂, ПАУ). Установлено, что именно ацетиленовые и пропаргиловые соединения оказывают большее влияние на конечный выход сажи, по-

этому большинство исследователей используют ацетилен в качестве основного предшественника сажи. В работе [8] предложен кинетический механизм образования сажи в цилиндре дизеля, состоящий из относительно небольшого количества реакций, что позволяет существенно сократить время вычислений (см. табл.).

Механизм образования сажи в дизелях при работе на дизельном топливе [8]

The mechanism of soot formation in diesel engines when working on diesel fuel [8]

Номер реакции	Реакция	lgA	B	E
<i>Термический крекинг углеводородов топлива</i>				
1	$(C_{14}H_{30})_n \rightarrow 2C_3H_6 + 3,5C_2H_4 + CH_4$	14	0	272
2	$(C_{14}H_{30})_n \rightarrow (C_{14}H_{30})_n$	14	0	272
3	$(C_6H_4CH_3CH_3)A \rightarrow C_6H_5CH_3 + 0,5C_2H_2 + 0,5H_2$	13,5	0	255
4	$C_3H_6 \rightarrow C_2H_4 + 0,5C_2H_2 + 0,5H_2$	13	0	304
5	$C_2H_4 \rightarrow C_2H_2 + H_2$	11,5	0	265
6	$CH_4 \rightarrow 0,5C_2H_4 + H_2$	13,5	0	398
7	$C_6H_5CH_3 \rightarrow 0,5C_2H_4 + 0,5H_2 + C_6H_5$	13,5	0	362
8	$C_6H_5 \rightarrow C_6H_3 + H_2$	13,5	0	190
<i>Механизм начальной стадии образования сажи</i>				
9	$C_2H_2 \rightarrow C_2H + H$	13,5	0	473
10	$C_2H_2 + C_2H_2 \rightarrow C_4H_3 + H$	13	0	190
11	$C_2H_2 + H \rightarrow C_2H + H_2$	14,18	0	79,6
12	$C_2H + H + M \rightarrow C_2H_2 + M$	16,86	0,573	-81,5

Продолжение таблицы

Номер реакции	Реакция	lgA	B	E
13	$C_2H_2 + C_2H \rightarrow C_4H_2 + H$	13,6	0	0
48	$H + H + M \rightarrow H_2 + M$	16,99	-0,6	0
14	$C_4H_3 \rightarrow C_4H_2 + H$	11,07	0	190
15	$C_4H_2 + M \rightarrow C_4H + H + M$	17,54	0	335
16	$C_4H + C_2H_2 \rightarrow C_6H_3$	11,81	0	27,2
17	$C_6H_3 \rightarrow C_6H_2 + H$	13,5	0	190
18	$C_4H + C_2H_2 \rightarrow C_6H_2 + H$	13,6	0	0
19	$C_6H_2 + M \rightarrow C_6H + H + M$	16,7	0	335
20	$C_6H + C_2H_2 \rightarrow C_8H_3$	11,81	0	27,2
21	$C_8H_3 \rightarrow C_8H_2 + H$	13,5	0	190
22	$C_6H + C_2H_2 \rightarrow C_8H_2 + H$	12,78	0	27,2
23	$C_8H_2 + M \rightarrow C_8H + H + M$	16,7	0	335
24	$C_8H + C_2H_2 \rightarrow C_{10}H_3$	11,81	0	27,2
25	$C_{10}H_3 \rightarrow C_{10}H_2 + H$	13,5	0	190
26	$C_8H + C_2H_2 \rightarrow C_{10}H_2 + H$	12,78	0	27,2
27	$C_{10}H_2 + M \rightarrow C_{10}H + H + M$	16,7	0	335
<i>Образование зародышей</i>				
28	$C_{10}H_2 + C_2H \rightarrow C_{12}H_2 + H$	12	0	0
29	$C_{10}H + C_2H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H$	12,78	0	27,2
<i>Гетерогенные реакции на поверхности частиц</i>				
30	$C_{12}H_2 + C_2H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + C_2$	13,2	0	131
31	$C_{12}H_2 + C_2H \rightarrow C_{12}H_2 + H + C_2$	11,56	0,5	0
32	$C_{12}H_2 + C_4H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + 2C_2$	11,41	0,5	0
33	$C_{12}H_2 + C_4H \rightarrow C_{12}H_2 + H + 2C_2$	11,41	0,5	0
34	$C_{12}H_2 + C_6H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + 3C_2$	11,33	0,5	0
35	$C_{12}H_2 + C_6H \rightarrow C_{12}H_2 + H + 3C_2$	11,33	0,5	0
36	$C_{12}H_2 + C_8H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + 4C_2$	11,27	0,5	0
37	$C_{12}H_2 + C_8H \rightarrow C_{12}H_2 + H + 4C_2$	11,27	0,5	0
38	$C_{12}H_2 + C_{10}H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + 5C_2$	11,22	0,5	0
39	$C_{12}H_2 + C_{10}H \rightarrow C_{12}H_2 + H + 5C_2$	11,22	0,5	0
<i>Гибель зародышей на частицах сажи</i>				
40	$C_{12}H_2 + C_{12}H_2 \rightarrow C_{12}H_2 + H_2 + 6C_2$	11,19	0,5	0
<i>Коагуляция частиц сажи</i>				
52	$C_{12}H_2 + C_{12}H_2 \rightarrow C_{12}H_2$	12,92	0,5	0
<i>Окисление и газификация частиц сажи</i>				
41	$(C_{12}H_2 + 0,5 C_2) + O_2 \rightarrow CO_2 + C_{12}H_2$	3,463	0	0
42	$(C_{12}H_2 + 0,5 C_2) + 0,5 O_2 \rightarrow CO + C_{12}H_2$	3,463	0	0
43	$(C_{12}H_2 + 0,5 C_2) + CO_2 \rightarrow 2 CO + C_{12}H_2$	3,463	0	0
44	$(C_{12}H_2 + 0,5 C_2) + H_2O \rightarrow CO + H_2 + C_{12}H_2$	3,463	0	0
<i>Окисление углеводородов и реакции равновесия</i>				
45	$C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2$	9,221	1	163,2
49	$2CO + H_2 \rightarrow C_2H_2 + O_2$	—	—	—
46	$H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$	14,56	0	28,7

Окончание таблицы

Номер реакции	Реакция	lgA	B	E
50	$H_2O \rightarrow H_2 + 0,5 O_2$	—	—	—
47	$CO + 0,5 O_2 \rightarrow CO_2$	10,212	—	118,4
51	$CO_2 \rightarrow CO + 0,5 O_2$	—	—	—
53	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	13,5	0	0
54	$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$	—	—	—
55	$CH_4 + CO_2 \rightarrow 2CO + 2H_2$	13,5	0	0
56	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$	—	—	—
57	$CH_4 + CH_4 \rightarrow C_2H_2 + 3H_2$	13,5	0	0
58	$C_2H_2 + 3H_2 \rightarrow CH_4 + CH_4$	—	—	—

В данной модели компонент $C_{12}H_2$ представляет частицу сажи, которая рассматривается в качестве «крупной молекулы».

Для определения концентрации компонентов газовой смеси в реакционной зоне был использован метод решения прямой задачи химической кинетики. Скорость изменения концентрации i -го компонента газовой смеси в предпламенной зоне может быть выражена уравнением

$$\frac{dM_i}{d\phi} = \left(\frac{dM_i}{d\phi}\right)_\sigma + \left(\frac{dM_i}{d\phi}\right)_k + \left(\frac{dM_i}{d\phi}\right)_\chi, \quad (1)$$

где ϕ – угол поворота коленчатого вала дизеля, град. ПКВ; $dM_i/d\phi$ – суммарная скорость изменения концентрации i -го компонента газовой смеси; $(dM_i/d\phi)_\sigma$ – скорость изменения концентрации i -го компонента, связанного с подводом испаренного топлива; $(dM_i/d\phi)_k$ – скорость изменения концентрации i -го компонента вследствие предпламенных химических превращений топлива; $(dM_i/d\phi)_\chi$ – скорость изменения концентрации i -го компонента в процессе основного горения.

Количество dM_i молей i -го вещества, вывезенного из зоны пиролиза, зависит от его объемной концентрации и пропорционально доле выгорающего топлива, моль/град ПКВ:

$$\frac{dM_i}{d\phi} = M_i \frac{dx/d\phi}{\sigma_u - x} = M_i B,$$

где x – интегральная функция тепловыделения; σ_u – интегральный закон испарения топлива в камере сгорания.

Скорости химических превращений реагентов газовой смеси определяются по уравнению

$$\left(\frac{dM_i}{d\phi}\right)_k = V_p \sum_j W_j,$$

где V_p – объем реакционной зоны; W_j – скорость j -й химической реакции кинетического механизма.

Скорости реакций рассчитываются по известным зависимостям с использованием справочных данных, приведенных в таблице.

Объем реакционной зоны определяется из расчета суммарного числа молей:

$$V_p = 83,14 \cdot \sum R_i T_i \frac{1}{P},$$

где R_i – количество молей i -го компонента газа в расчете на кг ДТ; T_i – температура в реакционной зоне; P – текущее давление в цилиндре.

Для определения массы сажи в цилиндре необходимо решить уравнение (1) относительно частиц C_2 . Учитывая реакций 30–44 таблицы уравнение (1) может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} \frac{dM_{C_2}}{d\phi} = & M_{C_2H} A + \frac{1}{6nV_p} [K_{30}[C_2H_2] + \\ & + K_{31}[C_2H] + 2(K_{32}[C_4H_2] + K_{33}[C_4H]) + \\ & + 3(K_{34}[C_6H_2] + K_{35}[C_6H]) + \\ & + 4(K_{36}[C_8H_2] + K_{37}[C_8H]) + \\ & + 5(K_{38}[C_{10}H_2] + K_{39}[C_{10}H]) + \\ & + 6K_{40}[C_{12}H_2] - 0,5(K_{41} + K_{42} + K_{43} + \\ & + K_{44})] - M_{C_2} B, \end{aligned} \quad (2)$$

где M_{C_2} – количество частиц C_2 на поверхности частиц, моль/кг; M_{C_2H} – начальное содержание C_2 ; n – частота вращения коленчатого вала дизеля; A – относительная функция подвода

компонента газа в реакционную зону в процессе испарения топлива.

Для определения совокупной массы частиц сажи в зоне термического крекинга необходимо количество сажи умножить на молярную массу C_2 :

$$N_{\text{обр}} = 24M_{C_2}.$$

Число N_c атомов углерода в частице сажи с её диаметром связано соотношением

$$D_c = 0,2715 \cdot 10^{-9} \sqrt[3]{N_c}.$$

Поскольку в условиях дизеля сорбционные реакции на поверхности частицы сажи протекают практически мгновенно, химический процесс горения углеродных частиц лимитируется скоростью диффузии, которая зависит от условий протекания рабочего процесса. Это значит, что скорость выгорания сажи определяется концентрацией основных окислительных компонентов в газовом потоке.

Скорость газификации твердого углерода в зоне выгорания сажи определяется по уравнению [9]

$$\frac{dN_{cГ}}{d\varphi} = -\frac{N_c F_y J_c}{4 \cdot 6n}, \quad (5)$$

где J_c – суммарный поток углерода, $г/(м^2 \cdot с)$; F_y – удельная поверхность частиц сажи, $г/м^2$.

Величина J_c рассчитывается по выражениям для всех реакций газификации свободным, оставшимся от сгорания топлива кислородом воздуха, углекислым газом и парами воды частиц сажи. Состав продуктов сгорания и величина потока углерода рассчитываются по отдельным подпрограммам (рис. 5).

С началом активного тепловыделения концентрация кислорода в локальной зоне горения постепенно падает и достигает минимальных значений после второго максимума скорости тепловыделения. Дальнейший рост концентрации кислорода связан с его диффузией в зону горения, вызванной ростом температуры газов и окончанием фазы диффузионного сгорания. Снижение концентраций углекислого газа и воды в зоне горения вызвано их отводом в зону продуктов сгорания и расходом на окисление сажи [11, 12].

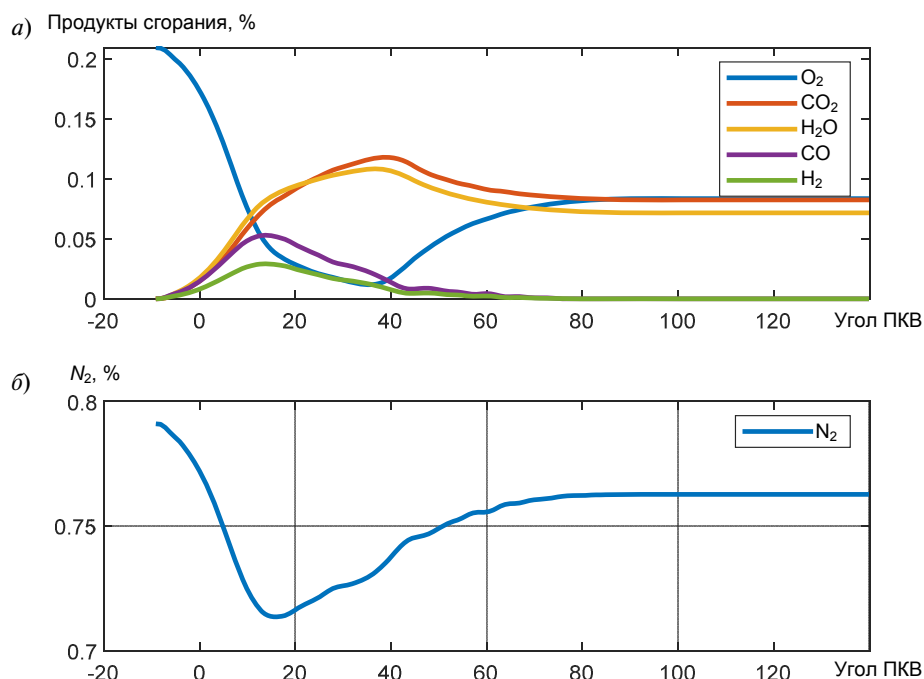


Рис. 5. Состав газов в зоне выгорания частицы сажи
 Fig. 5. Composition of gases in the burn-up zone of soot particles

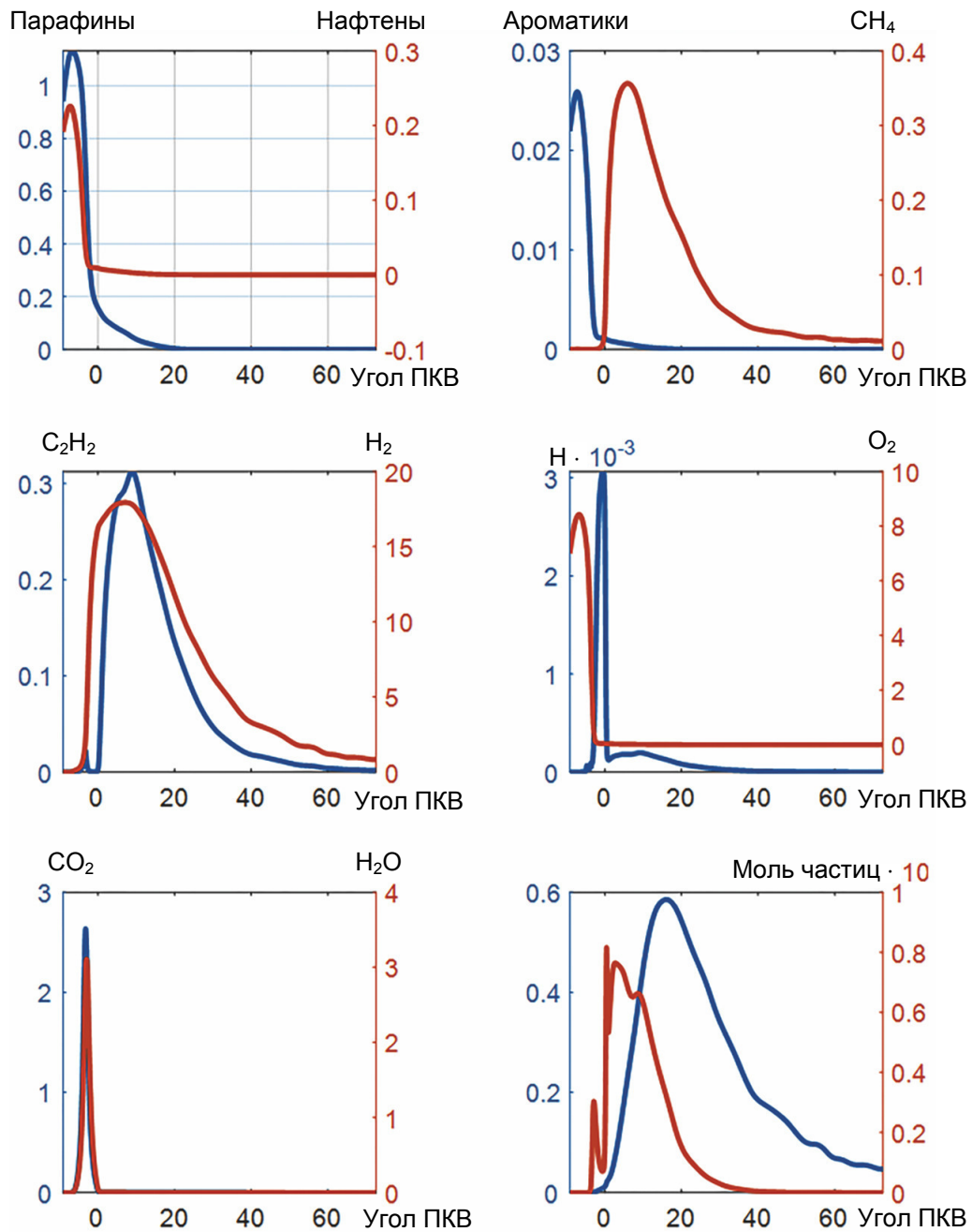


Рис. 6. Содержание, моль/кг, компонентов газовой смеси в предпламенной зоне
 Fig. 6. The content, mol/kg, of components of the gas mixture in predpremerny area

Результаты и обсуждение

В результате численного решения системы уравнений получаем текущее содержание компонентов газовой смеси в реакционной зоне (рис. 6).

Концентрация кислорода, поступающего вместе с воздухом в реакционную зону, очень

быстро падает после начала активного тепло-выделения. Вместе с этим на короткое время растет содержание продуктов полного сгорания углеводородов топлива. Затем начинается рост содержания продуктов глубокого пиролиза в реакционной зоне – ацетилена и метана. Подходящий в зону реакции кислород быстро

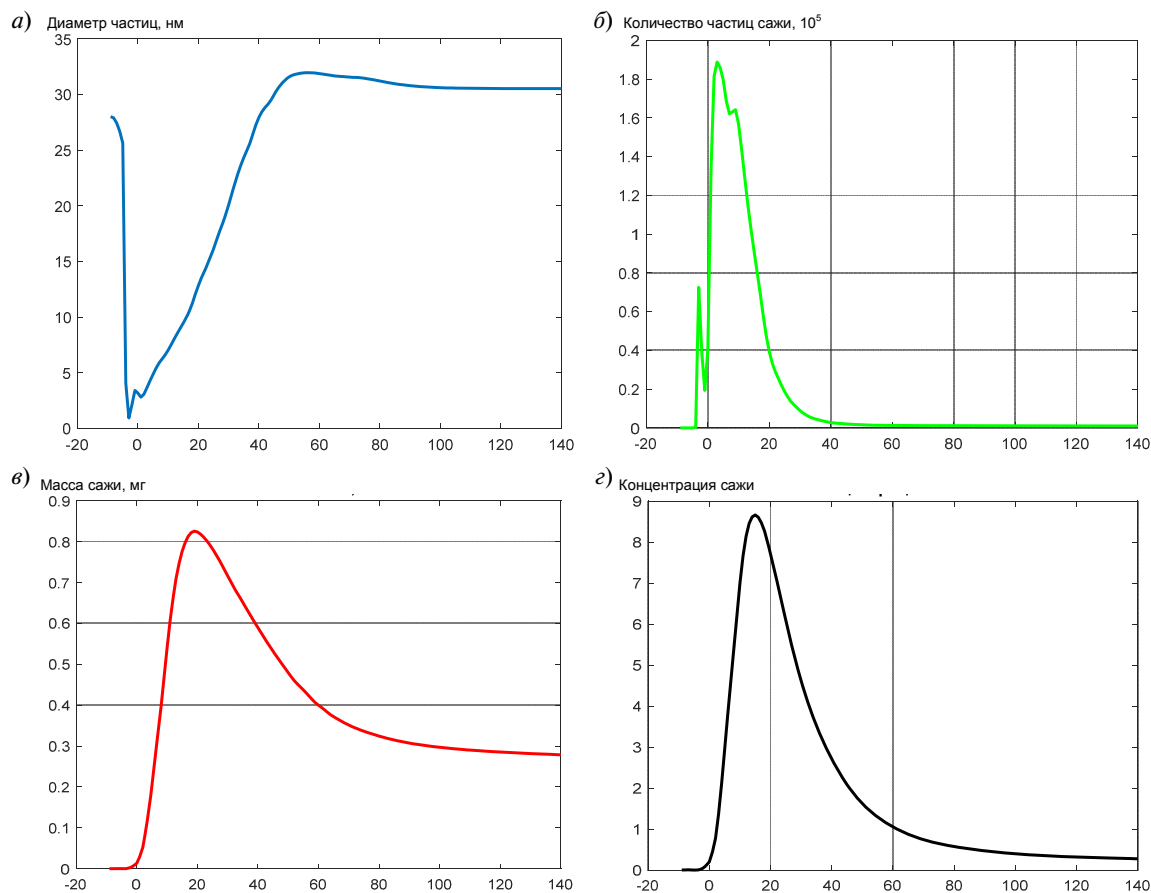


Рис. 7. Показатели сажесодержания в цилиндре дизеля в зависимости от угла ПКВ
 Fig. 7. Indicators of soot content in the diesel cylinder depending on the angle of the RCS

расходуется на реакции окисления и выводится с продуктами сгорания, поэтому его концентрация квазистационарна. Ускоренный гетерогенный рост сажи происходит при высокой температуре в реакционной зоне и достаточной концентрации углеводородного «сырья», в том числе молекул ацетилена. Падение массы сажи, выраженное в молях частиц C_2 , связано с выходом частиц сажи из реакционной зоны [13].

Частицы сажи в предпламенной зоне формируются с некоторой задержкой после начала тепловыделения при гомогенном горении топлива. При этом проявляется первый пик концентрации частиц. Как видно по результатам численного моделирования, большая часть частиц образуется при диффузионном сгорании

топлива. Частицы сажи продолжают образование до момента окончания подвода испаренного топлива в реакционную зону. Скорость образования частиц замедляется с увеличением скорости расходования зародышей сажи на гетерогенный рост дисперсного углерода на поверхности. Уменьшение количества частиц в зоне образования связано с процессом коагуляции и отводом частиц из зоны реакции [14].

Суммарные показатели сажесодержания в объеме цилиндра представлены на рис. 7. По результатам численного моделирования установлено, что минимальный средний диаметр частиц в цилиндре составляет 0,8 нм при угле 3,3 град. ПКВ до ВМТ. Максимальное количество частиц составило $2 \cdot 10^{15}$ при 0,5 градусов ПКВ. Максимальная масса сажи в цилиндре



превысила 0,82 мг. Угол, соответствующий максимальному содержанию сажи, – 19,2 град. ПКВ. В дальнейшем скорость газификации превысила скорость гетерогенного роста частиц сажи, и масса дисперсного углерода начала снижаться. Вместе с тем падала температура процесса выгорания, однако диффузия окислителя из участков камеры сгорания, не охваченных пламенем, поддерживала процесс интенсивной газификации. В результате суммарная масса частиц сажи в цилиндре упала до 0,279 мг при открытии выпускного клапана. При этом интенсивность процесса газификации существенно сократилась и не играла большой роли в суммарном сажевыделении. Учитывая падение температуры продуктов сгорания в выпускной системе дизеля, можно принять массу сажи при открытии выпускного клапана равной массе сажи при измерении в ОГ дизеля. При этом концентрация сажи в ОГ изменяется, поскольку изменяются параметры состояния газа [15].

Максимальная расчетная концентрация сажи в цилиндре достигается при 15 град. ПКВ после ВМТ и составляет 8,7 г/м³. В ОГ концентрация падает до 0,348 г/м³, что соответствует 4,8 ед. по шкале Bosch. Средний расчетный диаметр частиц сажи при открытии выпускного клапана составляет 30,5 нм. Расчетное количество частиц сажи средним диаметром 30,5 нм и плотностью 1,9 г/см³ при открытии выпускного клапана составляет 9,84·10¹² шт.

Заключение

По результатам численного моделирования получено содержание компонентов газовой смеси в реакционной зоне в зависимости от угла поворота коленчатого вала и определены такие показатели сажесодержания в объеме цилиндра, как минимальный средний диаметр частиц, максимальная масса сажи, угол, соответствующий максимальному содержанию сажи, суммарная масса частиц сажи в цилиндре и суммарное сажевыделение.

Рассчитанная динамика показателей сажевыделения в целом соответствует современным представлениям о механизме и основных этапах процессов образования и выгорания сажи в дизеле. Результаты моделирования дымности ОГ дизеля подтверждаются экспериментальными измерениями на различных режимах работы дизеля. Следовательно, представленная модель может быть использована для прогнозирования дымности ОГ дизелей при различных нагрузочных и скоростных режимах работы.

Авторы выражают глубокую благодарность за помощь и участие в выполнении отдельных этапов работы по моделированию сажеобразования в тепловых двигателях академику РАН, научному руководителю Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого **Юрию Сергеевичу Васильеву**.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев Ю.С.** Избранные сочинения. Экология. Охрана окружающей среды: сборник статей. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. университета, 2017. 220 с.
2. **Frances C. Moore.** Climate change and air pollution: exploring the synergies and potential for mitigation in industrializing countries // Sustainability. 2009. №1. P. 43–54.
3. **Sanli H., Canakci M., Alptekin E. [et al.]**. Effects of Waste Frying Oil Based Methyl and Ethyl Ester Biodiesel Fuels on the Performance, Combustion and Emission Characteristics of a di Diesel Engine // Fuel. 2015. Vol. 159. P. 179–187.
4. **Arent D.J., Wise A., Gelman R.** The status and prospects of renewable energy for combating global warming // Energy Economics. 2011. Vol. 33. Issue 4. P. 584–593.
5. **Titak W., Szwaja S., Lukacs K. [et al.]**. Alcohol-Diesel Fuel Combustion in the Compression Ignition Engine // Fuel. 2015. Vol. 154. P. 196–206.
6. **Козлов А.Н., Арасланов М.И.** Определение оптимальных установочных углов опережения

впрыскивания топлива дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и рапсовом масле // Аграрный научный журнал. 2014. № 6. С. 47–49.

7. **Лиханов В.А., Лопатин О.П.** Снижение токсичности отработавших газов автомобильного дизеля конвертацией на спирто-топливные эмульсии // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. №10. С. 54–59.

8. **Кожин Д.В.** Физико-химические основы математического моделирования процесса образования и выгорания сажи в дизельных ДВС: Монография. Йошкар-Ола: Изд-во Поволжского государственного технологического университета, 2015. 176 с.

9. **Агафонов Г.Л., Власов П.А., Рябиков О.Б.** Численное моделирование снижения образования твердых частиц сажи в камере сгорания дизелях // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. № 3. С. 15–21.

10. **Разлейцев Н.Ф.** Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. Харьков: Вища школа, 1980. 169 с.

11. **Kopeika A.K., Golovko V.V., Zolotko A.N. [et al.].** Influence of Biofuel Additions on the Ignition Delay of Single Diesel Fuel Drops // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. Vol. 88. № 4. P. 948–957.

12. **Mwangi J.K., Lee W.J., Chang Y.C. [et al.].** An Overview: Energy Saving and Pollution Reduction by Using Green Fuel Blends in Diesel Engines // Applied Energy. 2015. Vol. 159. С. 214–236.

13. **Lif A., Holmberg K.** Water-in-diesel emulsions and related systems // Advances in Colloid and Interface Science. 2006. Vol. 123. № 126. P. 231–239.

14. **Likhanov V.A., Lopatin O.P.** Use of Natural Gas, Methanol, and Ethanol Fuel Emulsions as Environmentally Friendly Energy Carriers for Mobile Heat Power Plants // Thermal Engineering. 2017. Vol. 64. № 12. P. 935–944.

15. **Torres-Jimenez E., Jerman M.S., Gregorc A. [et al.].** Physical and Chemical Properties of Ethanol-Diesel Fuel Blends // Fuel. 2011. Vol. 90. № 2. С. 795–802.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛИХАНОВ Виталий Анатольевич — доктор технических наук профессор Вятской государственной сельскохозяйственной академии

E-mail: lihanov.va@mail.ru

ЛОПАТИН Олег Петрович — кандидат технических наук доцент Вятской государственной сельскохозяйственной академии

E-mail: nirs_vsaa@mail.ru

КОЗЛОВ Андрей Николаевич — ассистент Вятской государственной сельскохозяйственной академии

E-mail: dnka59@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 21.01.2019

REFERENCES

[1] **Vasilyev Yu.S.** Izbrannyye sochineniya. Ekologiya. Okhrana okruzhayushchey sredy: sbornik statey. Sankt-Peterburg: Izd-vo Politekh. Universiteta, 2017. 220 s. (rus.)

[2] **Frances C. Moore** Climate change and air pollution: exploring the synergies and potential for mitigation in industrializing countries. *Sustainability*. 2009. № 1. P. 43–54. (rus.)

[3] **Sanli H., Canakci M., Alptekin E. [et al.].** Effects of Waste Frying Oil Based Methyl and Ethyl Ester Biodiesel Fuels on the Performance, Combustion and Emission Characteristics of a di Diesel Engine. *Fuel*. 2015. Vol. 159. P. 179–187.

[4] **Arent D.J., Wise A., Gelman R.** The status and prospects of renewable energy for combating global warming. *Energy Economics*. 2011. Vol. 33. Issue 4. P. 584–593.

[5] **Titak W., Szwaja S., Lukacs K. [et al.].** Alcohol-Diesel Fuel Combustion in the Compression Ignition Engine. *Fuel*. 2015. Vol. 154. P. 196–206.

[6] **Kozlov A.N., Araslanov M.I.** Opredeleniye optimalnykh ustanovochnykh uglov operezheniya vpryskivaniya topliva dizelya 2Ch 10,5/12,0 pri rabote na etanole i rapsovom masle. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*. 2014. № 6. С. 47–49. (rus.)

- [7] **Likhanov V.A., Lopatin O.P.** Snizheniye toksichnosti otrabotavshikh gazov avtomobilnogo dizel'ya konvertatsiyey na spirto-toplivnyye emulsii. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2018. T. 22. №10. S. 54–59.
- [8] **Kozhin D.V.** Fiziko-khimicheskiye osnovy matematicheskogo modelirovaniya protsessa obrazovaniya i vygoraniya sazhi v dizelnykh DVS: monografiya. Yoshkar-Ola: Izd-vo Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, 2015. 176 s. (rus.)
- [9] **Agafonov G.L., Vlasov P.A., Ryabikov O.B.** Chislennoye modelirovaniye snizheniya obrazovaniya tverdykh chastits sazhi v kamere sgoraniya dizelyakh. *Goreniye i vzryv*. 2017. T. 10. № 3. S. 15–21. (rus.)
- [10] **Razleytsev N.F.** Modelirovaniye i optimizatsiya protsessa sgoraniya v dizelyakh. Kharkov: Vishcha shkola, 1980. 169 s. (rus.)
- [11] **Kopeika A.K., Golovko V.V., Zolotko A.N.[et al.]**. Influence of Biofuel Additions on the Ignition Delay of Single Diesel Fuel Drops. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015. Vol. 88. № 4. P. 948–957.
- [12] **Mwangi J.K., Lee W.J., Chang Y.C. [et al.]**. An Overview: Energy Saving and Pollution Reduction by Using Green Fuel Blends in Diesel Engines. *Applied Energy*. 2015. Vol. 159. S. 214–236.
- [13] **Lif A., Holmberg K.** Water-in-diesel emulsions and related systems. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2006. Vol. 123. № 126. P. 231–239.
- [14] **Likhanov V.A., Lopatin O.P.** Use of Natural Gas, Methanol, and Ethanol Fuel Emulsions as Environmentally Friendly Energy Carriers for Mobile Heat Power Plants. *Thermal Engineering*. 2017. Vol. 64. № 12. P. 935–944.
- [15] **Torres-Jimenez E., Jerman M.S., Gregorc A. [et al.]**. Physical and Chemical Properties of Ethanol-Diesel Fuel Blends. *Fuel*. 2011. Vol. 90. № 2. S. 795–802.

THE AUTHORS

LIKHANOV Vitalii A. – *Vyatka state agricultural academy*

E-mail: lihanov.va@mail.ru

LOPATIN Oleg P. – *Vyatka state agricultural academy*

E-mail: nirs_vsaa@mail.ru

KOZLOV Andreii N. – *Vyatka state agricultural academy*

E-mail: dnka59@mail.ru

Received: 21.01.2019