

УДК 621.45.022.5

DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.10

Т.В. Абрамчук, А.М. Сипатов, М.И. Сухорук

ОДК-Авиадвигатель, Пермь, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ

В связи с введением нового стандарта, ограничивающего эмиссию нелетучих твердых частиц в выхлопных газах газотурбинного двигателя, становится актуальной задача анализа процесса образования и выгорания сажевых дисперсных частиц внутри камеры сгорания с целью разработки мероприятий по ее снижению.

В статье представлены результаты трехмерного численного моделирования образования дисперсных частиц с использованием феноменологической модели Линдштедта – Мосса в модельном диффузионном пламени предварительно испаренного керосина. Для моделирования горения керосина использовались кинетические механизмы смеси *n*-декана и ароматических углеводородов, процесс горения моделировался с использованием модели тонкого фронта пламени. Показано, что учет содержания ароматических углеводородов позволяет существенно улучшить качество моделирования дисперсных частиц. Наилучшее соответствие расчетных и экспериментальных данных показано для кинетического механизма, моделирующего горение *n*-декана и метилбензола.

Также на основе трехмерного численного моделирования процесса горения гомогенной смеси предварительно испаренного керосина и воздуха выполнена корректировка модели для моделирования процесса формирования дисперсных частиц при высоких давлениях, соответствующих натурным параметрам авиационного газотурбинного двигателя. Предложена эмпирическая формула учета влияния рабочего давления на процесс образования дисперсных частиц.

Ключевые слова: сажа, дисперсные частицы, камера сгорания, газотурбинный двигатель, рабочее давление, ароматические углеводороды, феноменологическая модель, турбулентное горение, модель тонкого фронта пламени, эмиссия.

T.V. Abramchuk, A.M. Sipatov, M.I. Sukhoruk

UEC-Aviadvigatel, Perm, Russian Federation

NUMERICAL SIMULATION OF PARTICULAR MATTER EMISSION USING A PHENOMENOLOGICAL MODEL OF SOOT FORMATION

Due to the introduction of a new standard limiting the emission of non-volatile solid particles in the exhaust gases of a gas turbine engine, the problem of analyzing the formation and burnout of particulate matter inside the combustion chamber becomes important in order to develop measures to reduce it.

The results of three-dimensional numerical simulation of the formation of dispersed particles using the phenomenological Lindstedt – Moss model in a diffusion flame of pre-evaporated kerosene presented. Kinetic mechanisms of *n*-decane and aromatic hydrocarbons mixture were used to simulate kerosene combustion with flamelet model. It is shown, that taking into account the content of aromatic hydrocarbons can significantly improve the quality of modeling of dispersed particles. The best correspondence of the calculated and experimental data is shown for the kinetic mechanism of *n*-decane and methylbenzene.

Based on three-dimensional numerical simulation of combustion process of a homogeneous mixture of pre-evaporated kerosene and air, the model was adjusted to simulate the formation of dispersed particles at high pressures corresponding to the full-scale parameters of an aviation gas turbine engine. An empirical formula for accounting for the effect of working pressure on the formation of dispersed particles is proposed.

Keywords: soot, particular matter, combustion chamber, gas turbine engine, operating pressure, aromatic hydrocarbons, phenomenological model, turbulent combustion, flamelet, emission.

Обеспечение выбросов вредных веществ (рис. 1) двигателями гражданской авиации в соответствии с требованиями Международной Организации Гражданской Авиации (International Civil Aviation Organisation – ICAO, ИКАО [1]) требует от разработчиков ГТД совершенствования процессов в камерах сгорания.

На протяжении всего времени с момента введения стандарта происходило регулярное ужесточение требований по эмиссии оксидов азота, поэтому основное внимание разработчиков

было направлено на развитие технологий сжигания топлива и конструкций КС именно в части обеспечения эмиссии NO_x . Регулирование выбросов дисперсных частиц до недавнего времени ограничивалось уровнем дымности двигателя и было основано на суррогатном параметре, отвечающем за видимость дыма в следе за двигателем (число дымности).

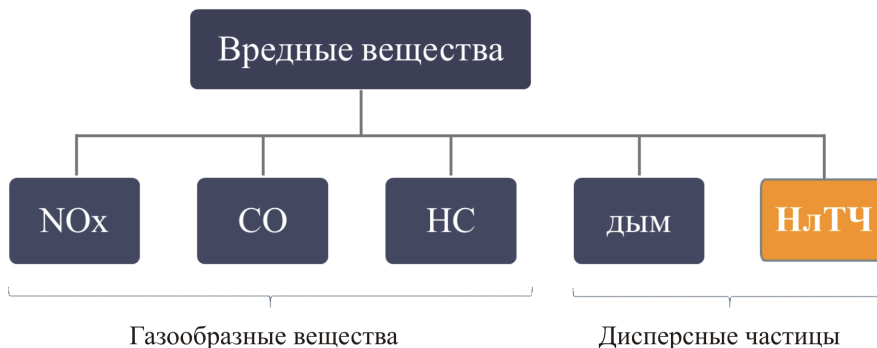


Рис. 1. Вредные вещества, ограниченные стандартом ИКАО

Развитие технологий малоэмиссионного сжигания топлив в КС авиационных ГТД [2], средств экспериментального определения эмиссии дисперсных частиц [3–5], анализ вреда дисперсных частиц на климат [6] здоровье человека [7] позволило вводить ограничения на значения их массовой и счетной концентраций. В результате на рубеже 2020 г. впервые за последние сорок лет был принят новый международный стандарт, ограничивающий выбросы нелетучих твердых частиц [8] для всех двигателей с тягой больше 26,7 кН. Стандарт действует на все разрабатываемые вновь двухконтурные турбореактивные двигатели (ТРДД), а также серийные двигатели, изготовленные начиная с 1 января 2020 г., и после введения в действие SAEP/11 постепенно заменит нормы на эмиссию дыма [2] (на данный момент для новых двигателей применяются ограничения как по уровню эмиссии дыма, так и нелетучих частиц).

Предполагается, что ГТД, обеспечивающий требования стандарта ИКАО по эмиссии дыма, автоматически обеспечивает и требования по эмиссии нелетучих частиц. Но для двигателей, запас по эмиссии дыма которых незначителен или находится вблизи границы соответствия, существует риск необеспечения новых требований по содержанию нелетучих твердых частиц (НЛТЧ) на выходе из сопла ГТД. Особенно остро задача снижения эмиссии дисперсных частиц может стоять перед камерами сгорания, в которых реализована технология «богатобедного» сжигания керосиновоздушной смеси (рис. 2), так как снижение эмиссии дисперсных частиц связано с риском ее «размена» на эмиссию NO_x .

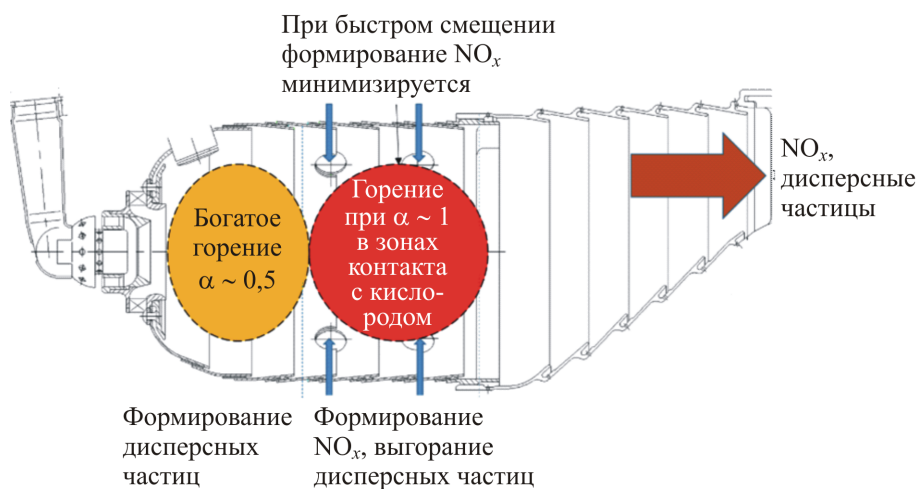


Рис. 2. Общая схема организации процесса горения топлива в КС богато-бедного типа

С учетом вышеизложенного, задача снижения эмиссии дисперсных частиц или формирования запаса по эмиссии НЛГЧ становится актуальной и требующей решения. Несмотря на то что на данный момент интенсивно исследуются пути снижения эмиссии дисперсных частиц за счет использования альтернативных видов топлива [9], авиационный керосин надолго останется основным топливом для авиации, соответственно основным направлением снижения эмиссии частиц является реализация новых технологий сжигания топлива в камерах сгорания, либо совершенствование уже реализованных «в железе» способов организации горения.

Полуэмпирическая модель образования дисперсных частиц Линдштедта – Мосса

Так как детальные экспериментальные исследования процессов внутри керосиновоздушных камер сгорания очень дороги, а зачастую невозможны в силу необходимости выполнения анализа данных процессов при параметрах, соответствующих режимам работы ГТД, целесообразно комплексное применение как экспериментальных, так и расчетных методов исследования процесса формирования дисперсных частиц внутри КС ГТД. Но для расчетного поиска оптимальной конструкции камеры сгорания со сниженным уровнем эмиссии дисперсных частиц необходимо наличие верифицированных моделей физических и газодинамических процессов, происходящих в камере сгорания, позволяющих выполнять инженерные расчеты по оценке эмиссии дисперсных частиц. На данный момент разрабатываются детальные модели образования частиц, но их использование при описании процесса образования дисперсных частиц в реальных конструкциях, в том числе камерах сгорания ГТД, сильно ограничено чрезвычайной ресурсоемкостью данных моделей [10]. Поэтому до сих пор наиболее подходящими для подобных целей по-прежнему являются модели с определенной долей эмпирики [11–14].

Образование дисперсных частиц – сложный процесс, состоящий из множества этапов. На основе исследований, выполненных на большом количестве различных пламен с использованием различных видов топлив, можно выделить следующие стадии формирования дисперсных частиц (рис. 3) [15]:

- зарождение частиц;
- поверхностный рост;
- коагуляция и агломерация частиц;
- выгорание.

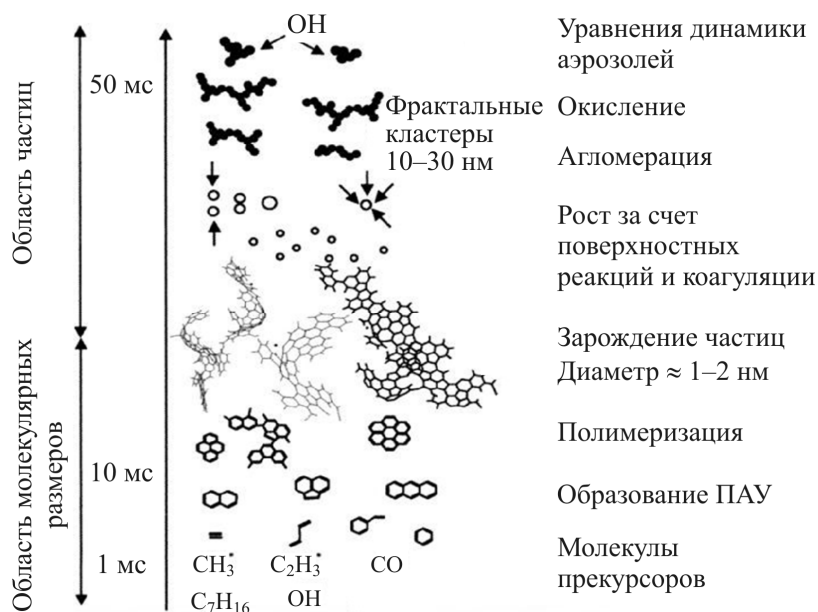


Рис. 3. Стадии образования сажи в процессе выгорания топлива [16] (ПАУ – полиароматические углеводороды)

Для описания процесса образования дисперсных частиц выбрана полуэмпирическая модель, предложенная двумя группами ученых – П. Линдштедтом [17] и Дж. Моссом [18]. Модель использует два транспортных уравнения: для массовой доли дисперсных частиц и для их счетной концентрации в потоке (1), (2) и позволяет описывать взаимодействие детальной химической кинетики и турбулентного течения и в различных вариациях используется при выполнении расчетов образования дисперсных частиц в предположении, что частицы имеют сферическую форму, и их распределение монодисперсно.

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{Y}_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{Y}_s)}{\partial x_j} = \left\{ \left(\bar{\mu} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial\tilde{Y}_s}{\partial x_j} \right\} + \tilde{S}_f \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{Y}_N)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{Y}_N)}{\partial x_j} = \left\{ \left(\bar{\mu} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial\tilde{Y}_N}{\partial x_j} \right\} + \tilde{S}_N. \quad (2)$$

Источниковые члены в уравнениях для массовой доли и счетной концентрации частиц сажи могут быть записаны в виде:

$$\rho S_f = R_1 + R_2 - R_3, \quad (3)$$

$$\rho S_N = R_4 - R_5, \quad (4)$$

где R_1 – зарождение (нуклеация) частиц,
 R_2 – поверхностный рост частиц,
 R_3 – окисление частиц,
 R_4 – нуклеация,
 R_5 – агломерация (коагуляция) частиц.

Зарождение частиц и их поверхностный рост обеспечивается за счет реакций присоединения ацетилена, который возникает в процессе распада молекул углеводородного топлива.

$$R_1 = 2k_1(T)[C_2H_2]M_s, \quad (5)$$

$$R_2 = k_2(T)\pi\left(\frac{6}{\pi\rho_s Y_N}\right)^{\frac{2}{3}}\rho Y_N Y_s^{\frac{1}{3}}[C_2H_2]M_s, \quad (6)$$

$$R_4 = \frac{N_A}{C_{\min}} R_1 = \frac{2}{C_{\min}} N_A k_1(T)[C_2H_2]. \quad (7)$$

Слипание частиц (коагуляция) в результате соударения определяется зависит от длины свободного пробега и размера частиц:

$$R_5 = 2C_a\left(\frac{6}{\pi\rho_s Y_N}\right)^{\frac{1}{6}}\left(\frac{6kT}{\rho_s}\right)^{\frac{1}{2}}Y_s^{\frac{1}{6}}(\rho Y_N)^2. \quad (8)$$

где R – универсальная газовая постоянная

Так как в процессе окисления сажевых частиц участвует ОН-радикал и молекулярный кислород, источниковый член для окисления частицы записан в виде:

$$R_3 = k_{O_2}(T)\pi\left(\frac{6}{\pi\rho_s Y_N}\right)^{\frac{2}{3}}Y_s^{\frac{2}{3}}\rho Y_N[O_2]M_s + k_{OH}(T)\pi\left(\frac{6}{\pi\rho_s Y_N}\right)^{\frac{2}{3}}Y_s^{\frac{2}{3}}\rho Y_N[OH]M_s. \quad (9)$$

Источниковые члены в уравнениях (5)–(9) содержат константу Аррениуса:

$$k_i = A_i T^{b_i} e^{-\frac{E_i}{RT}}.$$

Значения модельных констант для всех источниковых членов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели Линдштедта

Общие параметры		Параметры нуклеации				Рост массы частиц			Окисление частиц сажи					Агломерация	
ρ_s	M_s	A_1	b_1	E_1/R	C_{\min}	A_2	b_2	E_2/R	A_{O_2}	b_{O_2}	E_{O_2}/R	A_{OH}	b_{OH}	E_{OH}/R	C_a
2000	12,011	6300	0	21100	100	750	0	12100	715	0,5	19,68	0,36	0,5	0	9,0

Учет влияния ароматических углеводородов в топливе на образование дисперсных частиц

Для верификации модели сажеобразования и влияния учета состава топлива на процесс формирования сажи была выбрана модельная камера сгорания (рис. 4), описанная в [19].

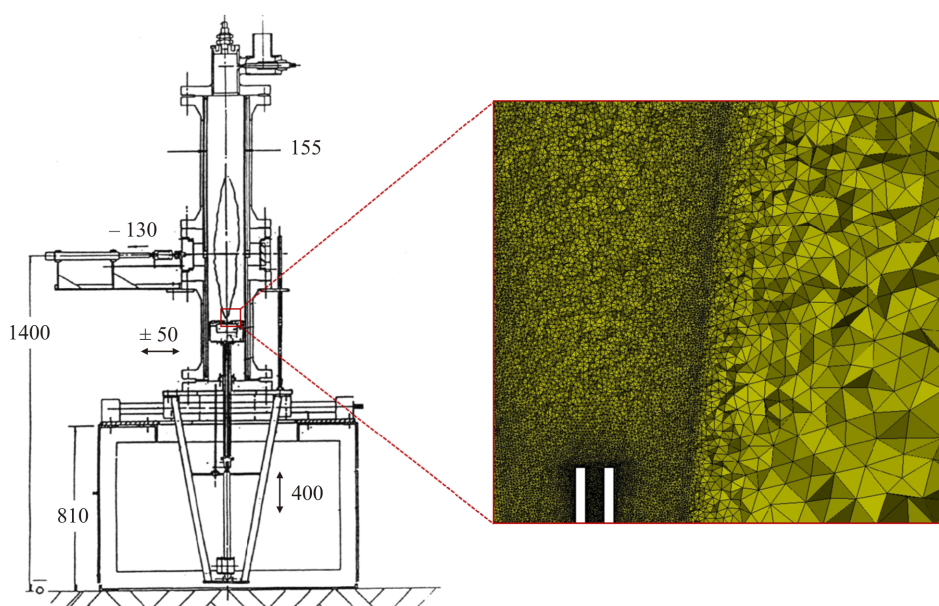


Рис. 4. Экспериментальная установка [19] и расчетная сетка вблизи сопла подачи топлива, мм

Исследовался процесс диффузионного горения предварительно испаренного керосина при атмосферном и повышенном давлениях (до 6,4 бар). В ходе эксперимента на удалении от сопла подачи топлива выполнялись радиальные измерения объемной доли сажи, результаты измерений концентрации сажи в радиальном направлении приведены только для низких давлений воздуха в КС.

Для выполнения численного моделирования была с использованием алгоритма Делоне построена неструктурированная тетраэдрическая расчетная сетка (рис. 4).

Параметры испытаний, использованные при расчете, приведены в табл. 2 [19].

Численное моделирование процесса горения испаренного керосина в модельной ЖТ выполнено в коммерческом газодинамическом пакете ANSYS CFX. Для описания турбулентного течения использована $k-\epsilon$ RNG модель. Для учета лучистого теплообмена использована модель P1. Моделирование процесса горения выполнено с использованием флеймлет-модели.

Таблица 2

Параметры эксперимента для модельной камеры сгорания

Параметр	P , бар	$V_{\text{возд}}$, м/с	$T_{\text{возд}}$, К	$V_{\text{топл}}$, м/с	$T_{\text{топл}}$, К
Значение	1	0,234	288	22,3	598

Примечание:

P – абсолютное давление;

$T_{\text{возд}}$, $T_{\text{топл}}$ – температура воздуха и топлива на входе в расчетную область соответственно;

$V_{\text{возд}}$, $V_{\text{топл}}$ – скорость воздуха и топлива на входе в КС соответственно.

На уровень эмиссии частиц влияет не только непосредственно процесс горения, но также и состав топлива. Так, наличие ароматических составляющих в авиационном керосине, содержание которых достигает 20 %, существенно усиливают формирование частиц. Для моделирования процесса горения керосина использовались два суррогата, разработанные в институте г. Ахен [20], и содержащие в своем составе ароматические углеводороды (табл. 3).

Таблица 3

Постановка задачи для моделирования диффузионного горения

Модель турбулентности	Модель горения	Модель суррогатного топлива	
		1	2
k - ϵ RNG	Flamelet	н-С ₁₀ H ₂₂ (80 %) метилбензол С ₇ H ₈ (20 %)	н-С ₁₀ H ₂₂ (80 %) триметилбензол С ₉ H ₁₂ (20 %)

Результаты моделирования дисперсных частиц с использованием уравнений (5)–(9) приведены на рис. 5. Для сопоставления расчетных и экспериментальных данных расчетные значения объемной концентрации сажи на различной высоте от сопла пришлось масштабировать путем умножения корректирующий множитель. Видно, что объемные концентрации частиц существенно занижены по сравнению с экспериментальными данными. Кроме того, некорректно описываются пиковые значения концентраций частиц. Одной из причин несоответствия расчетных и экспериментальных данных является то, что в модели не учитывается влияние наличия ароматических углеводородов на формирование дисперсных частиц.

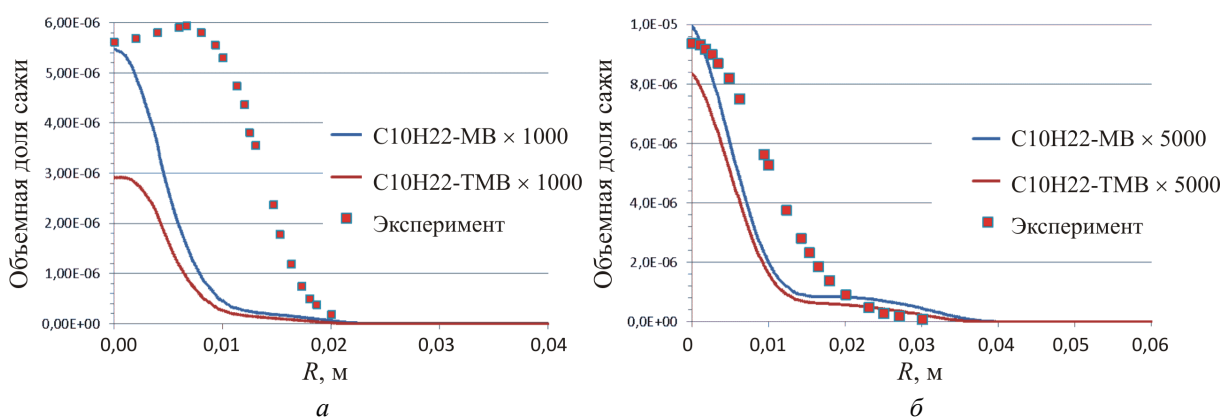
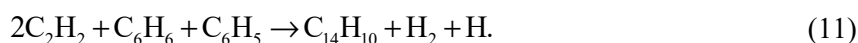


Рис. 5. Результаты расчета с ацетиленовой моделью формирования сажи:

a – профиль объемной доли сажи, $H = 205$ мм; b – профиль объемной доли сажи, $H = 300$ мм

В работе [21] предложена модель зарождения сажи на основе полиароматических углеводородов, согласно которой, в формировании дисперсных частиц участвуют ароматические углеводороды с двумя и тремя бензольными кольцами (С₁₀H₇ и С₁₄H₁₀), которые, в свою очередь,

формируются из ацетилена (C_2H_2), бензола (C_6H_6) и фенол-радикала (C_6H_5) по следующему реакционному механизму:



С учетом вышеизложенного источниковый член, описывающий нуклеацию, описан следующим образом [22]:

$$\frac{dN}{dt} = 8 \cdot c_2 \frac{N_A}{M_S} \left[\rho^2 \left(\frac{Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}} \right)^2 \frac{Y_{C_6H_5} W_{H_2}}{W_{C_6H_5} Y_{H_2}} \right] e^{-\frac{4378}{T}} + 8 \cdot c_3 \frac{N_A}{M_S} \left[\rho^2 \frac{Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}} \frac{Y_{C_6H_6}}{W_{C_6H_6}} \frac{Y_{C_6H_5} W_{H_2}}{W_{C_6H_5} Y_{H_2}} \right] e^{-\frac{6390}{T}}, \quad (12)$$

где $c_2 = 127e + 10^{8,88}$; $c_3 = 178e + 10^{9,50}$.

На рис. 6 показан результат моделирования с учетом полиароматической модели зарождения частиц, в сравнении с экспериментально полученными распределениями ($H = 205$ и $H = 300$ мм). Видно, что учет влияния ПАУ на образование сажи позволил существенно (на несколько порядков) улучшить точность расчета сажеобразования.

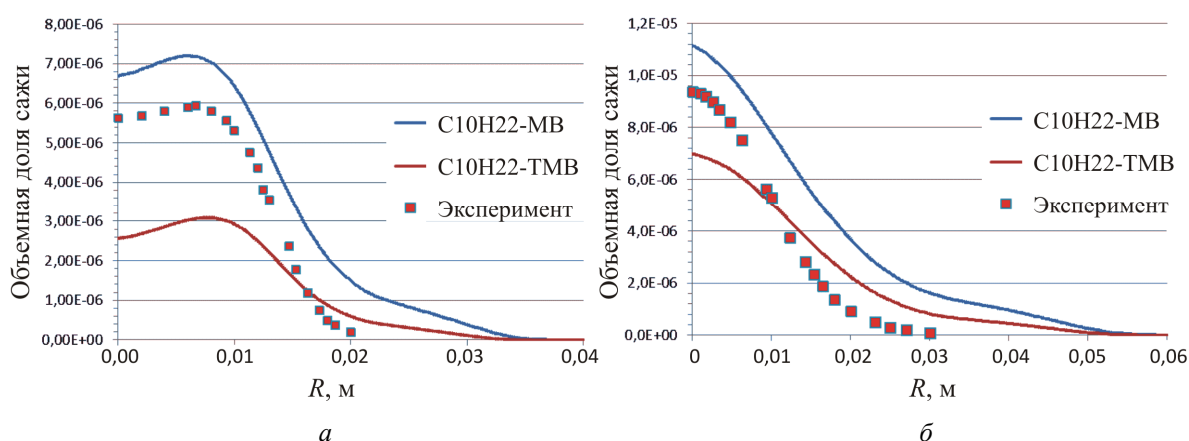


Рис. 6. Радиальный профиль объемной доли дисперсных частиц с учетом влияния полиароматических углеводородов на их формирование: *a* – профиль объемной доли сажи, $H = 205$ мм; *б* – профиль объемной доли сажи, $H = 300$ мм

По результатам моделирования показано, что модификация модели, учитывающая влияние ароматических углеводородов на формирование дисперсных частиц, позволила существенно улучшить результат моделирования и описать с приемлемой точностью профиль распределения объемной доли сажи, а также радиальное положение ее максимального значения. Наилучший результат в части описания профиля концентрации дисперсных частиц, а также описанию пиковых значений концентрации частиц показывает кинетический механизм для смеси *n*-декана и метилбензола. Данный механизм выбран для дальнейшего использования при выполнении расчетов процесса образования дисперсных частиц.

Учет влияния рабочего давления на процесс образования дисперсных частиц

Рабочее давление влияет на процесс поверхностного роста дисперсных частиц [23], соответственно, требуется учет его влияния для моделирования процессов в КС при натуральных параметрах работы ГТД. При этом, модельные эксперименты, на базе которых определены константы феноменологических моделей, выполнены при давлениях, далеких от натуральных.

Для выполнения валидации модели в части учета влияния рабочего давления на процесс сажеобразования выбран конструктивный вариант модельной камеры сгорания (рис. 7) со сжиганием за стабилизирующей решеткой гомогенной керосиновоздушной смеси, разработанный и исследованный отечественным коллективом ученых Ф.Г. Бакировым, В.М. Захаровым, И.З. Полещуком, З.Г. Шайхутдиновым [24].

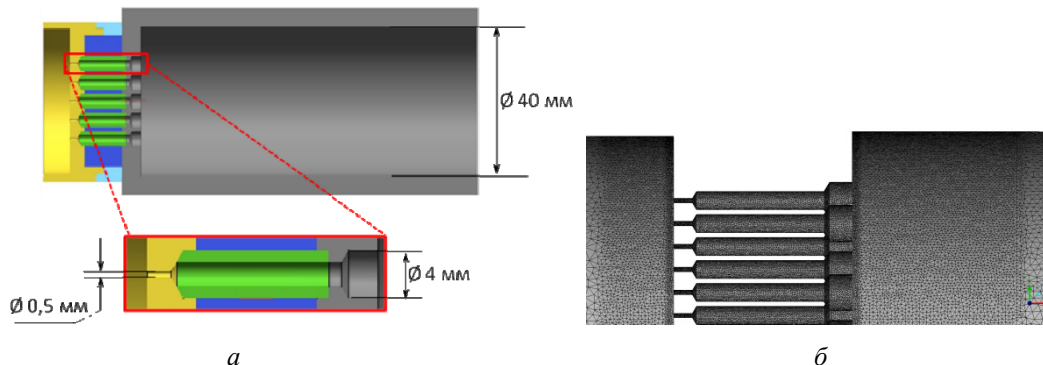


Рис. 7. Конструктивная схема горелочного устройства (а) и расчетная сетка (б)

Режимы для выполнения расчетов были выбраны при фиксированном значении коэффициента избытка воздуха и температуры гомогенной топливовоздушной смеси, подаваемой в КС, исходя из условия достижения равновесной температуры газа в ходе проведения эксперимента. Параметры выполнения расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры проведения расчетов

№ режима	T , К	α	P , МПа	$G_{\text{смеси}}$, кг/с
1	548	0,45	1,97	0,025
2	548	0,45	2,95	0,04

Для моделирования процесса горения предварительно перемешанной топливовоздушной смеси использовалась модификация флеймлет-модели горения – BVM, горение керосина описано суррогатным топливом в виде смеси н-декана и метилбензола, турбулентное течение топливовоздушной смеси моделировалось с использованием k - ϵ RNG модели. Неструктурированная тетраэдрическая расчетная сетка построена по алгоритму Делоне.

На рис. 8 показано поле концентрации дисперсных частиц для режимов «1» и «2».

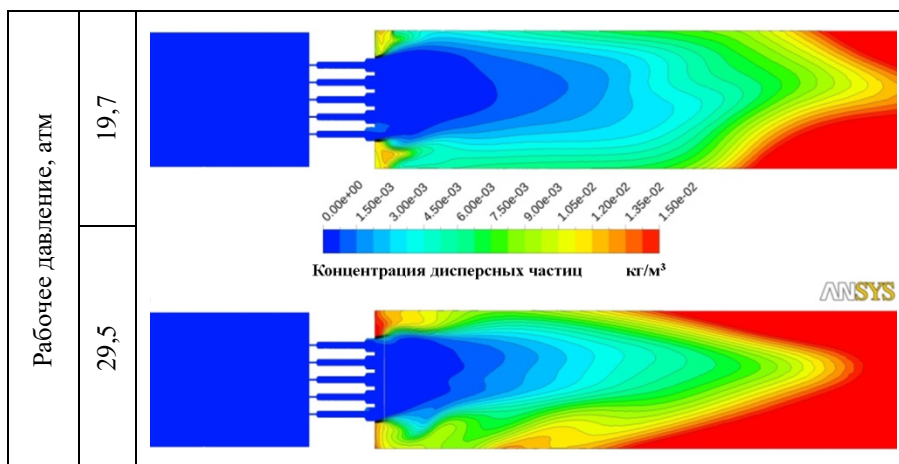


Рис. 8. Поле концентрации сажи в продольном сечении камеры сгорания

В табл. 5 приведены результаты расчета массовой концентрации сажевых частиц (соотношение измеренной массы частиц, приведенное к массе углерода в сгоревшем топливе) сравнении с экспериментальными данными. Для режима «1» получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных, а на режиме «2» отличие от эксперимента составило более двух раз. При этом, как уже сказано ранее, при повышении давления существенную роль в формировании частиц сажи начинает играть процесс поверхностного роста дисперсных частиц, описанный модели Линдштедта – Мосса уравнением (6). Видно, что результаты моделирования показывают отсутствие чувствительности модели к рабочему давлению при использовании соотношения (6).

Таблица 5

Результаты расчета процесса дисперсных частиц

Давление в КС	Массовая концентрация сажи (мг/г)	
	эксперимент	расчет
19,7	36,2	29,86
29,5	63,9	28,17

В экспериментах, выполненных в [24] при давлениях от 1,97 до 3,43 МПа и различных коэффициентах избытка показано, что массовая концентрация сажи на выходе из горелочного устройства линейно зависит от давления. Для учета линейной зависимости скорости поверхностного роста частиц от рабочего давления предэкспоненциальный множитель в уравнении (6) скорректирован в виде линейной зависимости от давления.

$$k_{2mod}(T) = A_{2mod} e^{-12100/T}, \quad (13)$$

где $A_{2mod} = 1,11299 \cdot A_2 \cdot P/P_0$; $P_0 = 19,7$ атм; P – рабочее давление в камере сгорания.

На рис. 9 и в табл. 6 показано сравнение результат моделирования процесса образования дисперсных частиц.

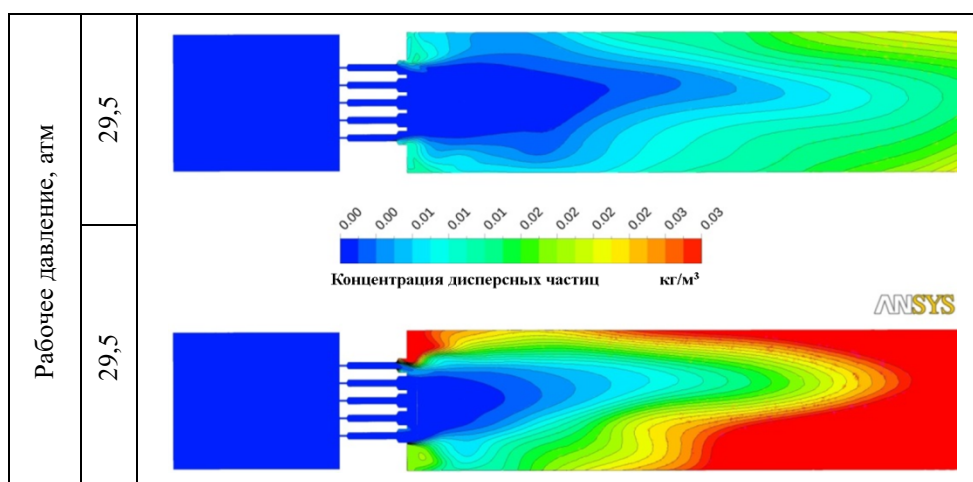


Рис. 9. Поле концентрации частиц в продольном сечении камеры сгорания с модифицированным уравнением для скорости поверхностного роста (внизу) и исходным (вверху)

Таблица 6

Результаты расчета процесса сажеобразования с уточненным коэффициентом поверхностного роста частиц в зависимости от давления

Давление в КС, атм	Массовая концентрация сажи, мг/г	
	эксперимент	расчет с модифицированным предэкспоненциальным множителем
19,7	36,2	29
29,5	63,9	60,48

Как видно из таблицы, модификация предэкспоненциального множителя (13) в выражении (6) позволила существенно улучшить согласование расчетных и экспериментальных данных.

Заключение

Учет содержания ароматических углеводородов оказывает существенное влияние на результат моделирования дисперсных частиц. По результатам решения верификационной задачи определено, что наилучшее согласование результатов расчетов и эксперимента при моделировании моделью Линдштедта – Мосса получено при использовании суррогатного керосина, описываемого кинетическим механизмом смеси *n*-декана и метилбензола.

На основании сравнения экспериментальных данных и результатов численного моделирования процесса гомогенного горения предварительно испаренного керосина в модельной камере сгорания при высоких давлениях выполнена корректировка уравнения поверхностного роста дисперсных частиц, учитывающая изменение давления.

Предложенная модификация модели может использоваться для численного моделирования процесса образования дисперсных частиц в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

Библиографический список

1. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации «Охрана окружающей среды», том II «Эмиссия авиационных двигателей» [Электронный ресурс]. – URL: https://www.vip-class.ru/userfiles/file/biblioteka/attach_16_2.pdf (дата обращения: 15.02.2023).
2. ICAO Doc 10127 Independent Expert Integrated Technology Goals Assessment and Review for Engines and Aircraft, 2019. – URL: http://www.icscc.org.cn/upload/file/20200603/20200603140731_33885.pdf (дата обращения: 15.02.2023).
3. Electron microscopic study of soot particulate matter emissions from aircraft turbine engines / A. Liati [et al.] // *Environmental Science & Technology*. – 2014. – No. 48. – P. 10975–10983.
4. Particle emission characteristics of a gas turbine with a double annular combustor / A.M. Boies [et al.] // *Aerosol Science and Technology*. – 2015. – No. 49. – P. 842–855.
5. Measurement of aircraft engine non-volatile PM emissions: results of the Aviation-Particle Regulatory Instrumentation Demonstration Experiment (A-PRIDE) 4 Campaign / P. Lobo [et al.] // *Aerosol Science and Technology*. – 2015. – No. 49. – P. 472–484.
6. Burkhardt U., Bock L., Bier A. Mitigating the contrail cirrus climate impact by reducing aircraft soot number emissions // *Climate and Atmospheric Science*. – 2018. – Article number, 37. – 7 p.
7. Non-volatile particle emissions from aircraft turbine engines at ground-idle induce oxidative stress in bronchial cells / H.R. Jonsdottir, M. Delaval, Z. Leni, A. Keller [et al.] // *Communications Biology*. – 2019. – Vol. 2. – Article number, 90. – 11 p.
8. Theo Rindlisbacher, New particulate matter standard for aircraft gas turbine engines. – ICAO environmental report, 2016. – 4 p.
9. Durdina L., Elser M., Anet J.G. Reduction of non-volatile particulate matter emissions of a commercial turbofan engine at ground level from use as a sustainable aviation fuel blend // *Environmental Science and Technology*. – 2021. – 25 p.
10. Modelling challenges in computing aeronautical combustion chambers / B. Fiorina, A. Vie, B. Franzelli, N. Darbadina [et al.] // *Aerospace Lab*. – June 2016. – Iss. 11. – 19 p.
11. P. Johnson., Chakrabarty R., Kumfer B. Evaluation of semi-empirical soot models for nonpremixed flames with increased stoichiometric mixture fraction and strain // *Combustion and Flame*. – September 2020. – Vol. 2019. – P. 70–85.
12. Johnson P., Chakrabarty R.K., Kumfer B.M. A modelling approach for soot formation in non-premixed flames with elevated stoichiometric mixture formation // *Combustion and Flame*. – 2021. – Vol. 229. – P. 111383.
13. Zang M., Ong J.C., Pang K.M., Bai X.-S., Walther J.H. Large eddy simulation of soot formation and oxidation for different ambient temperatures and oxygen levels // *Applied Energy*. – 2022. – Vol. 306. – P. 118094.
14. Lagrangian tracking of soot particles in LES of gas turbines / L. Gallen, A. Felden, E. Riber, B. Cuenot // *Proceeding of combustion institute*. – 2019. – Col 34, no. 4. – P. 5429–5436.
15. Haynes B.S., Wagner H.G. Soot formation // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 1981. – Vol. 7. – P. 229–273.

16. The Role of Biaryl Reactions in PAH and Soot Formation / A.F. Sarofim, J.P. Longwell, M.J. Wornat, J. Mukherjee // Springer Series in Chemical Physics. – 1994. – Vol. 59. – P. 485–499.
17. Lindstedt R.P. Simplified soot nucleation and surface grow steps for non-premixed-flames // Springer Series in Chemical Physics. – 1994. – Vol. 59. – P. 417–441.
18. Brookes S.J., Moss J.B. Predictions of soot and thermal radiation properties in confined turbulent jet diffusion flames // Combustion and flame. – 1999. – Vol. 116. – P. 486–503.
19. Young K.J., Stewart C.D., Moss J.B. Soot formation in turbulent nonpremixed kerosene-air flames burning at elevated pressure: Experimental measurement // Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion. – 1994. – Vol. 25, Iss. 1. – P. 609–617.
20. Thirty-Second International Symposium on Combustion, Mc Gill University, Montreal, Canada, August 3–8, 2008.
21. Hall R.J., Smooke M.D., Colket M.B. Physical and Chemical Aspects of Combustion: A Tribute to Irvine Glassman, F.L. Dryer and R.F. Sawyer (Ed). – Gordon&Breach, 1997. – P. 189.
22. Modelling soot formation in turbulent kerosene/air jet diffusion flames / Z. Wen, S. Yun, M.J. Thomson, M.F. Lightstone // Combustion and Flame. – Vol. 135. – 2003. – P. 323–340.
23. Roditcheva O.V., Bai X.S. Pressure effect on soot formation in turbulent diffusion flames // Chemosphere. – 2001. – Vol. 42. – P. 811–821.
24. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив / Ф.Г. Бакиров, В.М. Захаров, И.З. Полещук, З.Г. Шайхутдинов. – М.: Машиностроение, 1989. – 128 с.

References

1. Prilozheniye 16 k Konventsii o mezhdunarodnoy grazhdanskoy aviatsii "Okhrana okruzhayushchey sredy", tom II "Emissiya aviatsionnykh dvigateley" [Appendix 16 to the Convention on International Civil Aviation "Environmental Protection", Volume II "Emissions from Aircraft Engines"]. [Electronic resource]. URL: https://www.vip-class.ru/userfiles/file/biblioteka/attach_16_2.pdf (access date: 02/15/2023)
2. ICAO Doc 10127 Independent Expert Integrated Technology Goals Assessment and Review for Engines and Aircraft, 2019. URL: http://www.icscc.org.cn/upload/file/20200603/20200603140731_33885.pdf (accessed 02/15/2023).
3. Liati, A. et al. Electron microscopic study of soot particulate matter emissions from aircraft turbine engines. Environmental Science & Technology, no. 48, pp. 10975–10983, 2014.
4. Boies, A.M. et al. Particle emission characteristics of a gas turbine with a double annular combustor. Aerosol Science and Technology, no. 49, pp. 842–855 (2015).
5. Lobo, P. et al. Measurement of aircraft engine non-volatile PM emissions: results of the Aviation-Particle Regulatory Instrumentation Demonstration Experiment (A-PRIDE) 4 Campaign. Aerosol Science and Technology, no. 49, pp. 472-484 (2015)
6. U. Burkhardt, L.Bock, A. Bier Mitigating the contrail cirrus climate impact by reducing aircraft soot number emissions. Climate and Atmospheric Science, 2018, Article number: 37, 2018, 7 p.
7. H.R. Jonsdottir, M.Delaval, Z. Leni, A. Keller et. al. Non-volatile particle emissions from aircraft turbine engines at ground-idle induce oxidative stress in bronchial cells. Communications Biology, vol. 2, Article number: 90, 2019, 11 p.
8. Theo Rindlisbacher, New particulate matter standard for aircraft gas turbine engines, ICAO environmental report, 2016, 4 p.
9. L.Durdina, M.Elser, J.G. Anet Reduction of non-volatile particulate matter emissions of a commercial turbofan engine at ground level from use as a sustainable aviation fuel blend. Environmental Science and technology, 2021, 25 p.
10. B.Fiorina, A.Vie, B.Franzelli, N.Darbadina et al. Modelling challenges in computing aeronautical combustion chambers. Aerospace lab, Issue 11, June 2016, 19 p.
11. P. Johnson, R. Chakrabarty, B. Kumfer Evaluation of semi-empirical soot models for nonpremixed flames with increased stoichiometric mixture fraction and strain. Combustion and Flame, Volume 2019, September 2020, pp. 70-85.
12. P. Johnson, R.K. Chakrabarty, B.M. Kumfer. A modelling approach for soot formation in non-premixed flames with elevated stoichiometric mixture formation. Combustion and flame, vol. 229, 2021, P. 111383.
13. M.Zang, J.C. Ong, K.M. Pang, X.-S. Bai, J.H. Walther. Large eddy simulation of soot formation and oxidation for different ambient temperatures and oxygen levels. Applied Energy, 306, 2022, P. 118094.
14. L.Gallen, A.Felden, E.Riber, B.Cuenot. Lagrangian tracking of soot particles in LES of gas turbines. Proceeding of combustion institute, Col. 34, no. 4, pp 5429-5436, 2019.

15. Soot formation B.S. Haynes, H.G. Wagner, Prog. Energy Comb. Sci., Vol. 7, pp 229-273, Pergamon Press Ltd, 1981, Printed in Great Britain.
16. A.F. Sarofim, J.P. Longwell, M.J. Wornat, J. Mukherjee. The Role of Biaryl Reactions in PAH and Soot Formation. Springer Series in Chemical Physics, 1994, Vol. 59, pp. 485-499.
17. R.P. Lindstedt. Simplified soot nucleation and surface grow steps for non-premixed-flames. Springer Series in Chemical Physics, 1994, Vol. 59, pp. 417-441.
18. S.J. Brookes and J.B. Moss. Predictions of soot and thermal radiation properties in confined turbulent jet diffusion flames. Combustion and flame, Vol. 116, pp. 486-503, 1999.
19. K.J. Young, C.D. Stewart and J.B. Moss. Soot formation in turbulent nonpremixed kerosene-air flames burning at elevated pressure: Experimental measurement, Symposium (International) on Combustion Volume 25, Issue 1, 1994, Pages 609-617 Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion
20. Thirty-Second International Symposium on Combustion, Mc Gill University, Montreal, Canada, August 3-8, 2008.
21. R.J. Hall, M.D. Smooke, M.B. Colket, in Physical and Chemical Aspects of Combustion: A Tribute to Irvine Glassman, F.L. Dryer and R.F. Sawyer (Ed), Gordon&Breach, 1997, p. 189.
22. Z.Wen, S.Yun, M.J. Thomson, M.F. Lightstone. Modelling soot formation in turbulent kerosene/air jet diffusion flames. Combustion and Flame, Vol. 135, 2003, pp. 323-340.
23. Roditcheva O.V., Bai X.S. Pressure effect on soot formation in turbulent diffusion flames. Chemosphere, Vol. 42, 2001, pp. 811-821.
24. F.G. Bakirov, V.M. Zakharov, I.Z. Poleshchuk, Z.G. Shaykhutdinov, Obrazovaniye i vygoraniye sazhi pri szhiganiy uglevodorodnykh topliv [Formation and burnout of soot during combustion of hydrocarbon fuels]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1989, 128 p.

Об авторах

Абрамчук Тарас Викторович (Пермь, Россия) – заместитель начальника отдела, ОДК-Авиадвигатель (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 93, e-mail: t-avia83@yandex.ru).

Алексей Матвеевич Сипатов (Пермь, Россия) – начальник отделения камер сгорания, ОДК-Авиадвигатель (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 93).

Сухорук Марина Ивановна (Пермь, Россия) – ведущий инженер отдела по расчетным работам по камерам сгорания, ОДК-Авиадвигатель (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 93).

About the authors

Taras V. Abramchuk (Perm, Russian Federation) – Deputy Head of Department, UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: t-avia83@yandex.ru).

Aleksey M. Sipatov (Perm, Russian Federation) – head of combustor division, UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky av., Perm, 614990).

Marina I. Sukhoruk (Perm, Russian Federation) – senior engineer of combustor department, UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky av., Perm, 614990).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад 100 %.

Поступила: 21.02.2023

Одобрена: 21.02.2023

Принята к публикации: 28.02.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Абрамчук, Т.В. Численное моделирование эмиссии дисперсных частиц с использованием феноменологической модели сажеобразования / Т.В. Абрамчук, А.М. Сипатов, М.И. Сухорук // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2023. – № 72. – С. 125–136. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.10

Please cite this article in English as: Abramchuk T.V., Sipatov A.M., Sukhoruk M.I. Numerical simulation of particulate matter emission using a phenomenological model of soot formation. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2023, no. 72, pp. 125-136. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.10