

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ В ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРАХ КИСЛОРОДНО-МЕТАНОВЫХ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д.А. Сидлеров

sidlerov@rambler.ru

С.А. Федоров

shamusmacduly@gmail.com

АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Разработан метод для численного моделирования рабочих процессов в восстановительных газогенераторах с расчетом детальной структуры процесса образования конденсированной фазы (сажи). Полагают, что сажа образуется из газофазного горючего в два этапа. На первом этапе образуются активные ядра радикалов, а на втором этапе из этих ядер формируются частицы сажи. Выполнено численное моделирование процессов течения, смешения и горения топлива, а также сажеобразования в модельных восстановительных кислородно-метановых газогенераторах с газожидкостными соосными смесительными элементами струйно-струйного типа. Газогенераторы такого типа могут использоваться в перспективных кислородно-метановых жидкостных ракетных двигателях, работающих по открытой и замкнутой схемам с восстановительными газогенераторами, а также по схеме газ–газ, имеющей восстановительный и окислительный газогенераторы. Выполнен сравнительный анализ особенностей сажеобразования в газогенераторах с одно- и многофорсуночной смесительными головками. Показано, что уменьшение шага между смесительными элементами приводит к существенному изменению процессов смесеобразования, выгорания топлива и течения продуктов сгорания (при прочих равных условиях), что значительно снижает интенсивность образования конденсированной фазы в восстановительных газогенераторах. Метод численного моделирования будет использован при проведении исследований процессов горения топлива и образования конденсированной фазы в восстановительных газогенераторах современных и перспективных жидкостных ракетных двигателей на этапах разработки, конструирования и доводки

### Ключевые слова

*Жидкостный ракетный двигатель, газогенератор, численное моделирование, сажеобразование*

Поступила 17.12.2020

Принята 24.05.2021

© Автор(ы), 2021

**Введение.** Компоненты топлива кислород–метан (сжиженный природный газ, СПГ) в настоящее время считаются перспективными для жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) новых многоразовых ракет-носителей. В частности, в США ведутся разработки двигателей BE-4 и Raptor; оба двигателя работают по замкнутой схеме. В двигателе BE-4 используется окислительный газогенератор, а в Raptor применяются два газогенератора: окислительный и восстановительный. Для обеспечения работоспособности двигателя по замкнутой схеме с восстановительным газогенератором, вырабатывающим газ с избытком метана, особенно если рассматривается двигатель многократного использования, желательно минимизировать образование конденсированной фазы (сажи) в процессе смешения, горения компонентов топлива и течения продуктов сгорания.

Работы по исследованию особенностей применения метана (СПГ) в качестве горючего в паре с кислородным окислителем проводились в АО «НПО Энергомаш» [1, 2], КБхиммаш им. А.М. Исаева [3], АО КБХА [4].

Результаты ряда исследований [2–4] могут быть интерпретированы как свидетельствующие о весьма незначительном присутствии конденсированной фазы (сажи) в продуктах восстановительной газогенерации, что не создает проблем для работы двигателей однократного использования. Однако если речь идет о двигателях, которые могут быть использованы в составе многоразовых ракетно-космических комплексов с многократным включением в ходе выполнения каждой миссии, то вопрос влияния возможных отложений конденсированной фазы в трактах на надежность работы двигательной установки требует проведения дополнительных исследований, в том числе с использованием методов численного моделирования детальной структуры процесса сажеобразования.

В работе [5] приведены важные научные результаты расчетного моделирования конденсированной фазы, полученные на основе использования программы термодинамического моделирования TERRA [6]. Такой расчетный метод не учитывает влияние на процесс сажеобразования детальной структуры течения с рециркуляционными зонами и особенности распределения температур, концентраций и параметров турбулентности в области активного горения. В настоящей работе предложен подход, объединяющий в себе метод расчета детальной структуры процессов течения, смешения и горения топлива с моделью сажеобразования.

*Цель работы* — исследование особенностей сажеобразования в камерах сгорания кислородно-метановых газогенераторов с соосными двухкомпонентными форсунками струйно-струйного типа, работающими на жидком кислороде и газифицированном метане.

**Метод решения и принятые допущения.** Численное моделирование сажеобразования проводилось с помощью разработанного в АО ГНЦ «Центр Келдыша» метода расчета рабочего процесса в восстановительных газогенераторах с учетом образования конденсированной фазы. Расчетная процедура включает в себя метод численного моделирования турбулентного двухфазного течения, смешения и горения топлива в камерах сгорания и газогенераторах ЖРД [7] и модель образования конденсированной фазы. Известны различные подходы к моделированию сажеобразования при горении углеводородных топлив [5, 8–14]. Для описания сажеобразования использован подход Тесснера — Магнуссена [8], который на данном этапе может считаться оптимальным с точки зрения степени детализации процессов и сложности реализации расчетной процедуры.

Описание метода численного моделирования приведено в [7]. Физико-математическая модель включает в себя систему уравнений типа Навье — Стокса, двухпараметрическую ( $k$ - $\epsilon$ )-модель турбулентности, а также модель горения, учитывающую размыв турбулентных вихрей, и уравнение Аррениуса химической кинетики обобщенного типа. Расчет параметров испаряющихся капель жидкого распыленного топлива проводится в подходе Лагранжа, учитывается взаимовлияние газовой и капельной фаз в турбулентном потоке. Комплекс программ применяется для численного моделирования рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах двигателей, работающих на различных компонентах топлива и имеющих разнообразие типы смесительных элементов.

Работоспособность численного метода подтверждена сравнением с экспериментальными результатами, полученными для камер сгорания, работающих в модельных и натуральных условиях [7].

В модели Тесснера — Магнуссена [8] полагается, что сажа образуется из газообразного углеводородного горючего в два этапа. На первом этапе образуются активные ядра радикалов, а на втором этапе из этих ядер формируются частицы сажи.

Уравнение, описывающее образование и перенос активных ядер, можно представить в виде

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \hat{n} \vartheta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \hat{n} \vartheta) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu \vartheta}{\sigma_{\varphi}} \frac{\partial \hat{n}}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu \vartheta}{\sigma_{\varphi}} \frac{\partial \hat{n}}{\partial r} \right) + R_{nf} \vartheta. \quad (1)$$

Здесь  $x$ ,  $r$  — осевая и радиальная координаты;  $\rho$  — плотность газа;  $u$ ,  $v$  — продольная и радиальная компоненты скорости;  $n$  — концентрация активных частиц (радикалов),  $\hat{n} = n / \rho$ ;  $\vartheta = 1 - \vartheta_{\text{ж}}$  — объем, занятый газом ( $\vartheta_{\text{ж}}$  — объем жидкого топлива);  $\mu$  — эффективный коэффициент динамической

вязкости газа;  $\sigma_\varphi$  — число Шмидта для соответствующих переменных;  $R_{nf} = n_0 + (f - g)n - g_0nN - R_{nc}$ , где  $n_0 = a_0 f_c \rho X_\Gamma \exp(-E_n/(R_y T))$  — скорость самопроизвольного зарождения активных частиц ( $f_c$  — массовая доля углерода в горючем,  $X_\Gamma$  — массовая доля горючего,  $E_n$  — энергия активации);  $f$  — коэффициент линейного разветвления;  $g$  и  $g_0$  — коэффициенты линейного и квадратичного обрыва;  $N$  — концентрация частиц сажи;

$$R_{nc} = R_{sc} \frac{\hat{n}}{X_s}, \quad R_{sc} = \min \left\{ A \rho X_s \frac{\varepsilon}{k}, \quad A \frac{\rho X_o}{K_s} \left( \frac{\varepsilon}{k} \right) \frac{X_s K_s}{X_s K_s + X_\Gamma K_{стех}} \right\},$$

где  $A = 4$ ;  $X_s$  и  $X_o$  — массовые доли частиц сажи и окислителя;  $\varepsilon$  — скорость диссипации энергии турбулентности;  $k$  — кинетическая энергия турбулентности;  $K_s$  и  $K_{стех}$  — стехиометрические массовые соотношения для горения сажи и метана в кислороде.

Уравнение, описывающее формирование и перенос частиц сажи, можно записать в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u X_s \vartheta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v X_s \vartheta) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu \vartheta}{\sigma_\varphi} \frac{\partial X_s}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu \vartheta}{\sigma_\varphi} \frac{\partial X_s}{\partial r} \right) + R_{sf} \vartheta, \quad (2)$$

где  $R_{sf} = m_{sp} (a - bN) n - R_{sc}$ ,  $m_{sp} = \pi / (6 \rho_s d_s^3)$  — масса частицы сажи;  $\rho_s$  и  $d_s$  — плотность и диаметр частицы сажи.

Значения констант и параметров модели следующие:  $a = 10^5$ ;  $(f - g) = 10^2 \text{ с}^{-1}$ ;  $g_0 = 10^{-15}$ ;  $b = 8 \cdot 10^{-14}$ ;  $E_n/R_y = 9 \cdot 10^4 \text{ К}$ ;  $\rho_s = 2000 \text{ кг/м}^3$ ;  $d_s = 178,5 \text{ \AA}$ ;  $a_0 = 1,16 \cdot 10^{31} \text{ кг/с}$ .

**Результаты.** В ходе ранее проводимых работ по оптимизации конструктивных параметров смесительных элементов для газогенератора кислородно-метанового двигателя выполнялось численное моделирование процессов смешения и горения в исследовательской камере Mascotte [15–18] с помощью программного комплекса [7]. Камера имеет специальные оптические окна, а ее поперечный размер составляет  $\sim 50 \text{ мм}$ . Результаты расчетов полей течения, параметров турбулентности, концентраций и температур использованы как исходные данные для расчетов детальной структуры процесса сажеобразования.

В качестве основного варианта смесительных элементов рассматривались форсунки соосно-струйного типа. Через центральный цилиндрический канал подавался жидкий кислород ( $T_{O_2} \approx 90 \text{ К}$ ), а через внешний

кольцевой канал — газообразный метан ( $T_{\text{CH}_4} \approx 290 \text{ K}$ ). Внешний диаметр форсунки составлял  $d_k = 5,8 \text{ мм}$ .

Численное моделирование проводилось в осесимметричной постановке при соотношении компонентов  $K_M = 0,3$  и давлении 6 МПа. Расчеты доводились до сходимости численной процедуры и получения стационарного решения. Подробно результаты расчетов структуры течения, полей концентраций, температуры и параметров турбулентности, а также результаты сопоставления с экспериментальными данными компаний ONERA и SNECMA (Франция) приведены в [7]. На основании данных [19] для задания начальных распределений параметров капель использовалось распределение Гаусса, среднее значение диаметра капель принималось равным 20 мкм. Начальная скорость подачи газообразного метана составляла 230 м/с, а начальное среднее значение скорости капель жидкого кислорода 10 м/с. Концентрации активных радикалов и сажевых частиц на входе в газогенератор равны нулю. Внешние границы расчетной области считались адиабатическими.

Рассмотрим результаты расчетно-теоретического исследования процесса сажеобразования. На рис. 1 приведен фрагмент поля температуры на начальном участке зоны активного горения, где происходят существен-

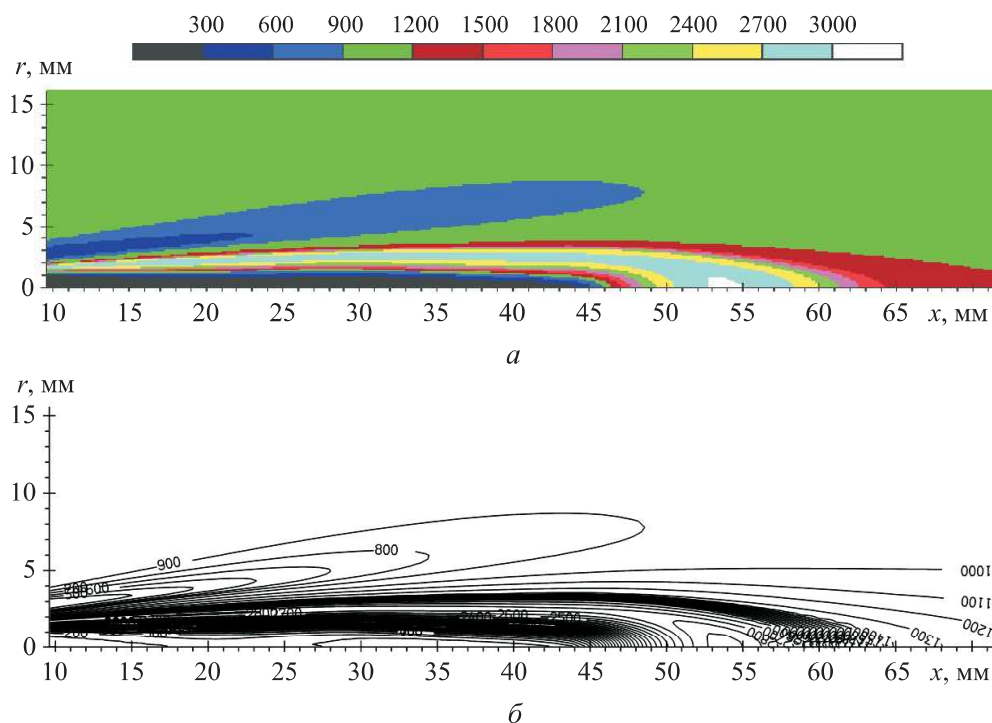


Рис. 1. Поле температуры (а) и изотермы (б),  $T$ , К

ные изменения температуры. Струя холодного распыленного кислорода занимает приосевую часть потока. Пламя стабилизируется за кромками кислородного сопла на обратных токах и вниз по потоку от них между струями кислорода и метана тянутся узкие зоны с высокой температурой. Полученное в расчете расстояние до максимальной температуры на осевой линии (длина пламени) составляет 54 мм, что хорошо совпадает с экспериментальным значением [7]. На рис. 2 и 3 приведены расчетные поля распределений концентрации активных радикалов  $n$  и массовой доли частиц сажи  $X_s$ , которые имеют аналогичный вид. Образование активных радикалов и частиц сажи начинается вокруг центральной зоны горения и продолжается в рециркуляционной зоне и вниз по потоку. Максимального значения концентрации активных радикалов и частиц сажи по расчетной области достигают в рециркуляционной зоне вблизи поверхности огневого днища.

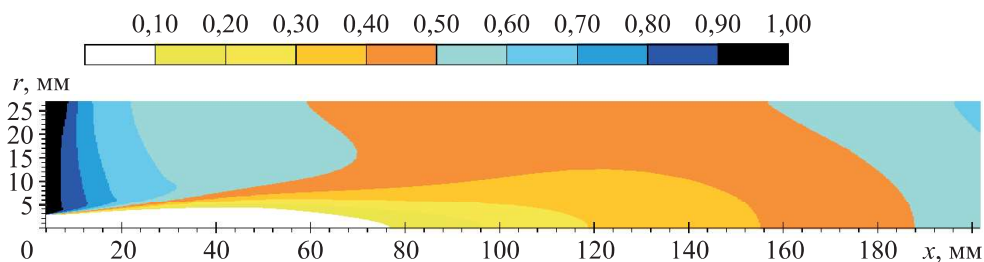


Рис. 2. Поле концентрации активных радикалов,  $n \cdot 10^{-17}$ ,  $\text{м}^{-3}$

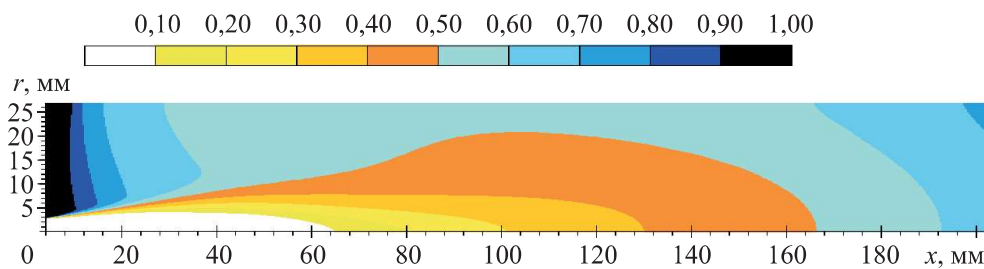


Рис. 3. Поле массовой доли частиц сажи,  $X_s \cdot 10^3$

При экспериментальных исследованиях в камере Mascotte регистрация сажи не проводилась, поэтому прямое сопоставление результатов расчетов сажеобразования с экспериментальными данными в рамках настоящей работы невозможно. Можно говорить лишь о качественном соответствии расчетных величин массовой доли сажи результатам экспериментальных исследований, проведенных при схожих значениях массовых соотношений компонентов топлива, но при отличающихся кон-

структивных и режимных параметрах [1–3]. Полученное значение массовой доли сажи в продуктах газогенерации на три порядка меньше значения, определяемого термодинамическим расчетом для конденсированного углерода, которое составляет 0,14.

Внутренний диаметр камеры Mascotte равен  $\sim 50$  мм. Характерное расстояние между форсунками на многофорсуночных головках значительно меньше и, соответственно, меньше диаметр элемента потока, приходящегося на одну форсунку. Для типичной конструкции смесительной головки многофорсуночного газогенератора со смесительными элементами рассматриваемого типа диаметр элемента потока, приходящегося на одну форсунку, может быть принят  $\sim 20$  мм. Струи от соседних форсунок могут существенным образом влиять друг на друга. В [7] приведены соответствующие изменения граничных условий и результаты расчета полей течения, концентраций, температур и параметров турбулентности в элементе потока для камеры сгорания с многофорсуночной смесительной головкой. На основе полученных данных проведен расчет сажеобразования, результаты которого представлены на рис. 4–6. В структуре рабочего процесса произошли очень существенные изменения. В частности, длина пламени уменьшилась до  $\sim 38$  мм и изменилась его форма. Существенно уменьшилась длина примыкающей к днищу камеры тороидальной рециркуляционной зоны, которая охватывает истекающую из форсунки струю генераторного газа снаружи. Циркулирующий в этой зоне относительно

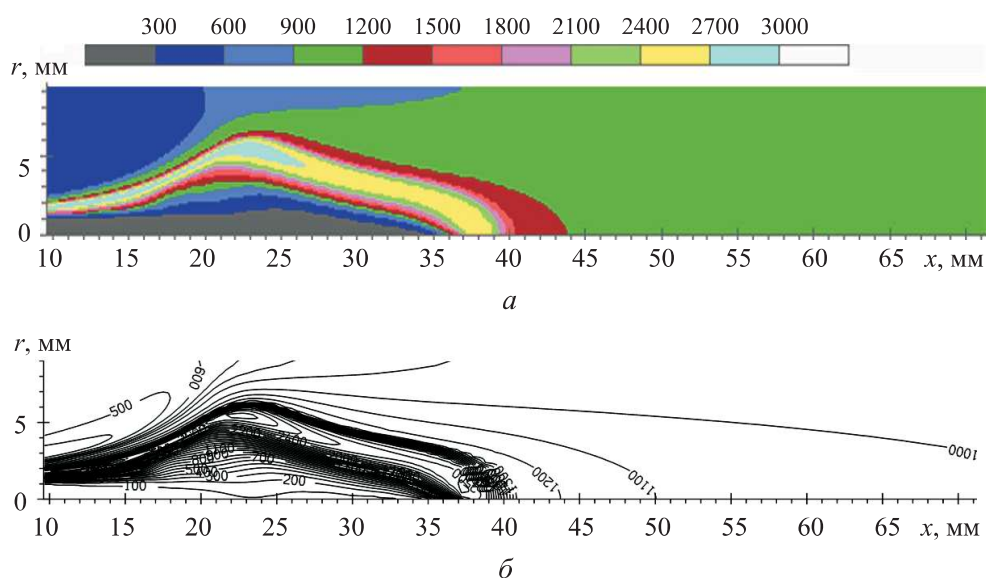


Рис. 4. Расчетные поле температуры (а) и изотермы (б),  $T$ , К

холодный газ (температура варьируется в диапазоне 300...500 К) состоит из горючего с небольшой примесью продуктов сгорания. Как следует из рис. 5 и 6, такая перестройка процессов смешения, течения и горения по сравнению с вариантом для камеры Mascotte (см. рис. 2, 3) привела к существенному ослаблению процесса сажеобразования. В холодной рециркуляционной зоне сажа практически не образуется, а рост концентрации активных радикалов и частиц сажи начинается вниз по потоку от зоны горения. Увеличение скорости течения, связанное с уменьшением поперечного размера элемента потока, соответствующего одной форсунке в многофорсуночной камере сгорания газогенератора (по сравнению с однофорсуночным газогенератором Mascotte), ведет к сокращению времени пребывания продуктов сгорания в газогенераторе. Этот фактор также приводит к уменьшению концентрации частиц сажи в выходном сечении газогенератора.

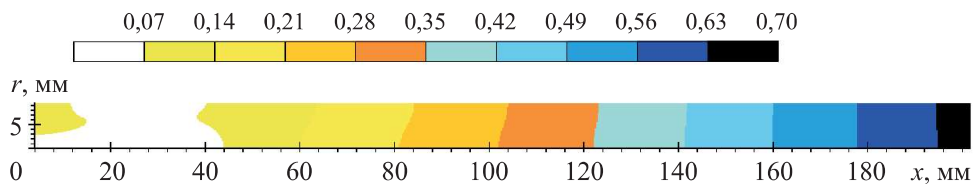


Рис. 5. Расчетное поле концентрации активных радикалов,  $n \cdot 10^{-14}, \text{ м}^{-3}$

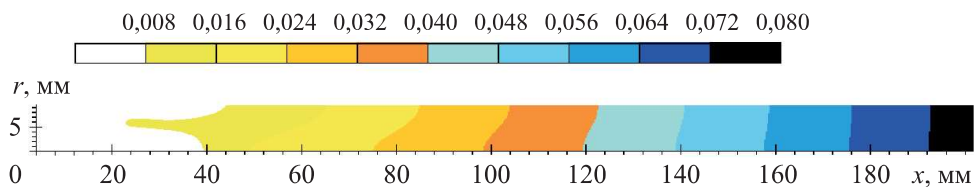


Рис. 6. Расчетное поле массовой доли частиц сажи,  $X_s \cdot 10^6$

Данные, полученные при исследовании в модельной камере с одиночной форсункой, не отражают процесс сажеобразования в многофорсуночных газогенераторах.

**Выводы.** Разработан метод численного моделирования детальной структуры рабочего процесса в восстановительных газогенераторах с учетом образования конденсированной фазы (сажи).

Выполнено численное моделирование детальной структуры процесса сажеобразования в модельных восстановительных кислородно-метановых газогенераторах.

Показано, что уменьшение шага между смесительными элементами приводит к существенному изменению процессов смесеобразования, вы-



горения топлива и течения продуктов сгорания (при прочих равных условиях), что значительно снижает интенсивность образования конденсированной фазы (сажи) в восстановительных газогенераторах.

Метод численного моделирования будет использован при проведении исследований процессов горения топлива и образования конденсированной фазы (сажи) в восстановительных газогенераторах современных и перспективных ЖРД на этапах разработки, конструирования и доводки.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Белов Е.А., Богушев В.Ю., Клепиков И.А. и др. Результаты экспериментальных работ в НПО «Энергомаш» по освоению метана как компонента топлива для ЖРД. *Труды НПО «Энергомаш» имени академика В.П. Глушко*, 2000, т. 18, с. 86–100.
- [2] Аджян А.П., Лёвочкин П.С. Особенности разработки восстановительного газогенератора для метанового многорежимного двигателя. *Труды НПО «Энергомаш» имени академика В.П. Глушко*, 2012, т. 29, с. 211–223.
- [3] Leontev N.I., Kolkin Ye.N., Zavyalov V.S. KB Khimmash LOX/LNG development status. *48th Int. Aerospace Cong.* Berlin, 2000, pp. 23–28.
- [4] Gorokhov V.D., Rachuk V.S., Grigorenko I.N. Development of liquid propulsion engines, working on liquefied natural gas and liquid oxygen. *1st Int. Conf. Green Propellants for Space Propulsion*. Noordwijk, Netherlands, 2001, pp. 235–240.
- [5] Dorofeev A.A., Yagodnikov D.A. Thermodynamic modeling of the composition and characteristics of combustion products of overrich liquid rocket fluids in the quenching mode. *High Temp.*, 2018, vol. 56, no. 2, pp. 263–269.  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X18010066>
- [6] Трусов Б.Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, № 1. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-1-31>
- [7] Kalmykov G.P., Larionov A.A., Sidlerov D.A., et al. Numerical simulation and investigation of working process features in high-duty combustion chambers. *J. Engin. Thermophys.*, 2008, vol. 17, no. 3, pp. 196–217.  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1810232808030053>
- [8] Magnussen B.F., Hjertager B.H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. *Symp. (Int.) Combust.*, 1977, vol. 16, no. 1, pp. 719–729. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80366-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80366-4)
- [9] Теснер П.А. Образование углерода из углеводов газовой фазы. М., Химия, 1972.
- [10] Krestinin A.V., Kislov M.B., Raevskii A.V., et al. On the mechanism of soot particle formation. *Kinet. Catal.*, 2000, vol. 41, no. 1, pp. 90–98.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02756146>

- [11] Krestinin A.V. Detailed modeling of soot formation in hydrocarbon pyrolysis. *Combust. Flame*, 2000, vol. 121, no. 3, pp. 513–524.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(99\)00167-4](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(99)00167-4)
- [12] Lautenberger Ch.W., de Ris J.L., Dembsey N.A., et al. A simplified model for soot formation and oxidation in CFD simulation of non-premixed hydrocarbon flames. *Fire Saf. J.*, 2005, vol. 40, no. 2, pp. 141–176.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2004.10.002>
- [13] Sarlak R., Shams M., Ebrahimi R. Numerical simulation of soot formation in a turbulent diffusion flame: comparison among three soot formation models. *Proc. Inst. Mech. Eng. C: J. Mech. Eng. Sc.*, 2012, vol. 226, no. 5.  
DOI: <https://doi.org/10.1177%2F0954406211421997>
- [14] Yunardi A., Elwina B., Sylvia N., et al. A comparative performance study of soot formation models in methane elevated pressure non-premixed flames. *Appl. Mech. Mater.*, 2012, vol. 110-116, pp. 18–22.  
DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.18>
- [15] Karatas Ah.E., Gulder O.L. Soot formation in high pressure laminar diffusion flames. *Prog. Energy Combust. Sc.*, 2012, vol. 38, no. 6, pp. 818–845.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.04.003>
- [16] Leung K.M., Lindstedt R.P., Jones W.P. A simplified reaction mechanism of soot formation in non-premixed flames. *Combust. Flame*, 1991, vol. 87, no. 3-4, pp. 289–305.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(91\)90114-Q](https://doi.org/10.1016/0010-2180(91)90114-Q)
- [17] Habiballah M., Vingert L., Traineau J.C., et al. Mascotte — a test bench for cryogenic combustion research. *47th Int. Astronaut. Cong.*, Beijing, 1996, p. 77.
- [18] Habiballah M., Orain M., Grisch F., et al. Experimental studies of high-pressure cryogenic flames on the Mascotte facility. *Combust. Sc. Tech.*, 2006, vol. 178, no. 1-3, pp. 101–128. DOI: <https://doi.org/10.1080/00102200500294486>
- [19] Ledoux M., Micci M., Vingert L. Atomization of coaxial-jet injectors. *Proc. 2nd Int. Symp. Liquid Rocket Propulsion*, 1995, pp. 2-1–2-19.

**Сидлеров Дмитрий Анатольевич** — д-р техн. наук, начальник отдела АО ГНЦ «Центр Келдыша» (Российская Федерация, 125438, Москва, Онежская ул., д. 8).

**Федоров Сергей Алексеевич** — инженер 2-й категории АО ГНЦ «Центр Келдыша» (Российская Федерация, 125438, Москва, Онежская ул., д. 8).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Сидлеров Д.А., Федоров С.А. Численное моделирование сажеобразования в восстановительных газогенераторах кислородно-метановых жидкостных ракетных двигателей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 4 (139), с. 19–31. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-4-19-31>

## SOOT FORMATION NUMERICAL SIMULATION IN REDUCING GAS GENERATORS OF OXYGEN-METHANE LIQUID ROCKET ENGINES

D.A. Sidlerov

sidlerov@rambler.ru

S.A. Fedorov

shamusmacduly@gmail.com

JSC SSC “Center Keldysh”, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

A method for numerical simulation of operating processes in reducing gas generators with calculation of the condensed phase (soot) formation process detailed structure has been developed. It is assumed that soot is formed from gas-phase fuel in two stages. At the first stage, active radical nuclei are formed, and at the second stage, carbon black particles are formed from these nuclei. Numerical modeling of processes, fuel mixing and combustion, as well as soot formation in model reducing oxygen-methane gas generators with gas-liquid coaxial mixing elements of jet-jet type has been performed. Gas generators of this type can be used in promising oxygen-methane liquid rocket engines operating on open and closed circuits with reducing gas generators, as well as on the gas-gas circuit having reducing and oxidizing gas generators. A comparative analysis of soot formation features in gas generators with single- and multi-nozzle mixing heads has been performed. It is shown that a decrease in the pitch between the mixing elements leads to a significant change in the mixture formation processes, fuel combustion and the flow of combustion products (all other conditions being equal), which significantly reduces the intensity of condensed phase formation in reducing gas generators. The numerical simulation method will be used for studies of fuel combustion and condensed phase formation in regenerative gas generators of modern and advanced liquid rocket engines at the stages of development, design and improvement

### Keywords

*Liquid rocket engine, gas generator, numerical simulation, soot formation*

Received 17.12.2020

Accepted 24.05.2021

© Author(s), 2021

---

### REFERENCES

- [1] Belov E.A., Bogushev V.Yu., Klepikov I.A., et al. Experimental results of NPO “Energomash” works on methane learning as a part of fuel for liquid propellant system. *Trudy NPO “Energomash” imeni akademika V.P. Glushko*, 2000, vol. 18, pp. 86–100 (in Russ.).

- [2] Adzhyan A.P., Levochkin P.S. The peculiarities of development of fuel-rich preburner for methane multi-mode engine. *Trudy NPO "Energomash" imeni akademika V.P. Glushko*, 2012, vol. 29, pp. 211–223 (in Russ.).
- [3] Leontev N.I., Kolkin Ye.N., Zavyalov V.S. KB Khimmash LOX/LNG development status. *48th Int. Aerospace Cong.* Berlin, 2000, pp. 23–28.
- [4] Gorokhov V.D., Rachuk V.S., Grigorenko I.N. Development of liquid propulsion engines, working on liquefied natural gas and liquid oxygen. *1st Int. Conf. Green Propellants for Space Propulsion*. Noordwijk, Netherlands, 2001, pp. 235–240.
- [5] Dorofeev A.A., Yagodnikov D.A. Thermodynamic modeling of the composition and characteristics of combustion products of overrich liquid rocket fluids in the quenching mode. *High Temp.*, 2018, vol. 56, no. 2, pp. 263–269.  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X18010066>
- [6] Trusov B.G. Code system for simulation of phase and chemical equilibriums at higher temperatures. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, no. 1 (in Russ.).  
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-1-31>
- [7] Kalmykov G.P., Larionov A.A., Sidlerov D.A., et al. Numerical simulation and investigation of working process features in high-duty combustion chambers. *J. Engin. Thermophys.*, 2008, vol. 17, no. 3, pp. 196–217.  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1810232808030053>
- [8] Magnussen B.F., Hjertager B.H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. *Symp. (Int.) Combust.*, 1977, vol. 16, no. 1, pp. 719–729.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80366-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80366-4)
- [9] Tesner P.A. *Obrazovanie ugleroda iz uglevodorodov gazovoy fazy* [Carbon producing from gaseous hydrocarbons]. Moscow, Khimiya Publ., 1972.
- [10] Krestinin A.V., Kislov M.B., Raevskii A.V., et al. On the mechanism of soot particle formation. *Kinet. Catal.*, 2000, vol. 41, no. 1, pp. 90–98.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02756146>
- [11] Krestinin A.V. Detailed modeling of soot formation in hydrocarbon pyrolysis. *Combust. Flame*, 2000, vol. 121, no. 3, pp. 513–524.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(99\)00167-4](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(99)00167-4)
- [12] Lautenberger Ch.W., de Ris J.L., Dembsey N.A., et al. A simplified model for soot formation and oxidation in CFD simulation of non-premixed hydrocarbon flames. *Fire Saf. J.*, 2005, vol. 40, no. 2, pp. 141–176.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2004.10.002>
- [13] Sarlak R., Shams M., Ebrahimi R. Numerical simulation of soot formation in a turbulent diffusion flame: comparison among three soot formation models. *Proc. Inst. Mech. Eng. C: J. Mech. Eng. Sc.*, 2012, vol. 226, no. 5.  
DOI: <https://doi.org/10.1177%2F0954406211421997>

[14] Yunardi A., Elwina B., Sylvia N., et al. A comparative performance study of soot formation models in methane elevated pressure non-premixed flames. *Appl. Mech. Mater.*, 2012, vol. 110-116, pp. 18–22.

DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.18>

[15] Karatas Ah.E., Gulder O.L. Soot formation in high pressure laminar diffusion flames. *Prog. Energy Combust. Sc.*, 2012, vol. 38, no. 6, pp. 818–845.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.04.003>

[16] Leung K.M., Lindstedt R.P., Jones W.P. A simplified reaction mechanism of soot formation in non-premixed flames. *Combust. Flame*, 1991, vol. 87, no. 3-4, pp. 289–305. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(91\)90114-Q](https://doi.org/10.1016/0010-2180(91)90114-Q)

[17] Habiballah M., Vingert L., Traineau J.C., et al. Mascotte — a test bench for cryogenic combustion research. *47th Int. Astronaut. Cong.*, Beijing, 1996, p. 77.

[18] Habiballah M., Orain M., Grisch F., et al. Experimental studies of high-pressure cryogenic flames on the Mascotte facility. *Combust. Sc. Tech.*, 2006, vol. 178, no. 1-3, pp. 101–128. DOI: <https://doi.org/10.1080/00102200500294486>

[19] Ledoux M., Micci M., Vingert L. Atomization of coaxial-jet injectors. *Proc. 2nd Int. Symp. Liquid Rocket Propulsion*, 1995, pp. 2-1-2-19.

**Sidlerov D.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Head of Department, JSC SSC “Center Keldysh” (Onezhskaya ul. 8, Moscow, 125438 Russian Federation).

**Fedorov S.A.** — Engineer, JSC SSC “Center Keldysh” (Onezhskaya ul. 8, Moscow, 125438 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Sidlerov D.A., Fedorov S.A. Soot formation numerical simulation in reducing gas generators of oxygen-methane liquid rocket engines. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2021, no. 4 (139), pp. 19–31 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-4-19-31>