

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНТИПУЛЬСАЦИОННЫХ ПЕРЕГОРОДОК НА РАЗВИТИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ КИСЛОРОДНО-КЕРОСИНОВОГО ЖРД С ФОРСУНКАМИ СТРУЙНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО ТИПА МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.В. Мосолов  
Д.А. Сидлеров

mosolov@list.ru  
sidlerov@rambler.ru

ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», Москва,  
Российская Федерация

---

### Аннотация

Исследовано влияние антипульсационных перегородок на структуру стационарного рабочего процесса в камере сгорания кислородно-керосинового жидкостного ракетного двигателя с форсунками струйно-центробежного типа. Рассмотрены два варианта камер сгорания с одинаковыми схемами расположения форсунок: без перегородок и с тонкими перегородками, установленными на форсуночном днище. Показано, что установка перегородок в камерах со струйно-центробежными форсунками приводит к возникновению участка с повышенной температурой в угловой зоне между боковой стенкой камеры сгорания и радиальной перегородкой

### Ключевые слова

*Жидкостный ракетный двигатель, камера сгорания, численное моделирование, горение топлива*

Поступила в редакцию 25.10.2016  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

При доводке камеры сгорания кислородно-керосинового двигателя средней тяги, работающего по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа, были обнаружены следы воздействия повышенной температуры в угловой зоне между боковой стенкой камеры сгорания и радиальной перегородкой. Для выяснения причин этого нежелательного явления была проведена серия расчетов с помощью разработанных в Центре Келдыша методов численного моделирования двухфазных осесимметричных и трехмерных турбулентных течений с горением в камерах сгорания и газогенераторах жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) [1, 2]. В настоящее время методы численного моделирования успешно применяются в разных странах для анализа процессов горения в камерах ЖРД [3–9].

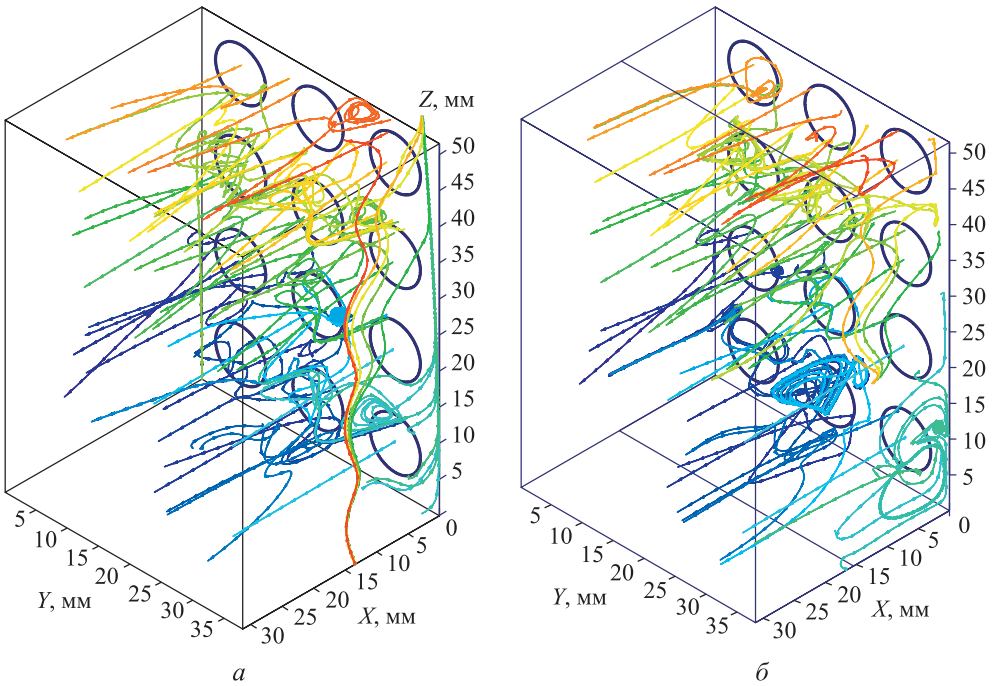
Описание физико-математической модели разработанного метода приведено в [10]. Математическая модель включает в себя уравнения типа Навье — Стокса,  $(k-\varepsilon)$ -модель турбулентности и модель горения, учитывающую процесс размыва турбулентных вихрей, а также обобщенное уравнение химической кинетики аррениусова типа. Расчеты движения, прогрева, испарения и дробления капель жидкого горючего и окислителя проводятся в подходе Лагранжа мето-

дом дискретных капель. При этом учитывается взаимообмен массой, импульсом и энергией между фазами газа и капель с учетом особенностей турбулентного течения. Уравнения в частных производных для газовой фазы дискретизируются методом контрольного объема и численно решаются алгоритмом типа SIMPLER [11], а обыкновенные дифференциальные уравнения для дискретной (капельной) фазы интегрируются методом Рунге — Кутты. Программный комплекс применяется для численного моделирования детальной структуры рабочего процесса в модельных и натурных камерах сгорания, имеющих смесительные элементы разнообразных типов и работающих на различных компонентах топлива [10, 12–16]. Достоверность результатов численного моделирования подтверждена сопоставлениями с экспериментальными данными для модельных и натурных камер сгорания [10, 12].

Цель работы — моделирование рабочего процесса в камере сгорания кислородно-керосинового ЖРД со струйно-центробежными форсунками и исследование особенностей, обусловленных установкой антипульсационных перегородок.

Рассмотрим результаты исследований для камеры сгорания, работающей на компонентах топлива кислород+керосин по схеме с дожиганием окислительно-генераторного газа при давлении 150 бар (15 МПа). На смесительной головке камеры используются соосные двухкомпонентные струйно-центробежные форсунки внутреннего смешения с заглубленным центральным каналом генераторного газа. Форсунки такого типа используются в современных отечественных и зарубежных двигателях. Схема размещения форсунок приведена на рис. 1. Ось  $X$  расположена в продольном направлении (перпендикулярно днищу форсуночной головки), ось  $Y$  — в поперечном направлении (перпендикулярно боковой стенке камеры), а ось  $Z$  — в тангенциальном направлении (параллельно днищу форсуночной головки и боковой стенке). Значение  $x = 0$  соответствует плоскости огневого днища форсуночной головки, а значение  $y = 38$  мм — боковой стенке камеры сгорания.

Рассмотрены два варианта камер сгорания с одинаковыми схемами расположения форсунок: 1) камеры без перегородок (рис. 1, а), 2) на форсуночном днище камеры в плоскости  $XY$  установлены тонкие перегородки (рис. 1, б) длиной  $L_{\text{пер}} \sim 15$  мм (в направлении  $X$ ), разделяющие начальный участок камеры на блоки, содержащие 12 форсунок (четыре в тангенциальном направлении  $Z$  и три в поперечном направлении  $Y$ ). При выбранной схеме расположения форсунок течение в камере сгорания без перегородок имеет периодическую структуру по направлению  $Z$  с шагом, равным расстоянию между форсунками  $\Delta z_{\text{ф}}$ . Однако при установке перегородок этот период увеличивается до  $4\Delta z_{\text{ф}}$ . Для удобства сопоставления результатов в обоих вариантах периодическое граничное условие ставилось на интервале  $4\Delta z_{\text{ф}}$  и соответствующие сечения располагались посередине между форсунками, т. е.  $\Phi_{(z=0)} = \Phi_{(z=52 \text{ мм})}$ , где  $\Phi$  — любой параметр потока. Эти сечения также совпадают с плоскостями установки перегородок, на поверхностях которых для задания граничных условий использовались функции стенки.



**Рис. 1.** Пространственные линии тока для камеры сгорания без перегородок (а) и с перегородками (б)

Для расчета процессов распыливания, испарения, смешения и горения компонентов топлива внутри форсунок применен разработанный ранее метод численного моделирования двухфазных турбулентных течений с горением в осесимметричном приближении [1]. Полученные результаты использованы в качестве граничных условий для задания распределений параметров потока (скоростей, концентраций, энтальпии, температуры, параметров  $k$  и  $\epsilon$ ) в сечении днища смесительной головки ( $x = 0$ ) при проведении трехмерных расчетов.

Общая структура потока, образующегося при истечении струй из каналов форсунок, их взаимодействии и догорании в объеме камеры сгорания, видна на пространственной картине линий тока (см. рис. 1).

Более подробная структура течения на начальном участке изображена на проекциях линий тока в разных продольных и поперечных сечениях внутреннего объема камеры (рис. 2–4). Сложную структуру имеют рециркуляционные зоны, примыкающие к огневому днищу. Вследствие закрутки круговые струи первоначально испытывают деформацию растяжения-сжатия во взаимно перпендикулярных направлениях. Отметим характерную особенность течения в камере с перегородками — мощную вихревую структуру, образующуюся в угловой зоне между огневым днищем, перегородкой и боковой стенкой камеры (рис. 1, б, 2, б, 3, б). Установка перегородок также кардинальным образом меняет картину линий тока у боковой стенки камеры (см. рис. 2). Регулярная структура потока с периодом  $\Delta z_{\text{ф}}$ , имеющего монотонное направление, меняется на нерегулярную с переменным направлением течения. Сильно различаются картины течения у левой и правой

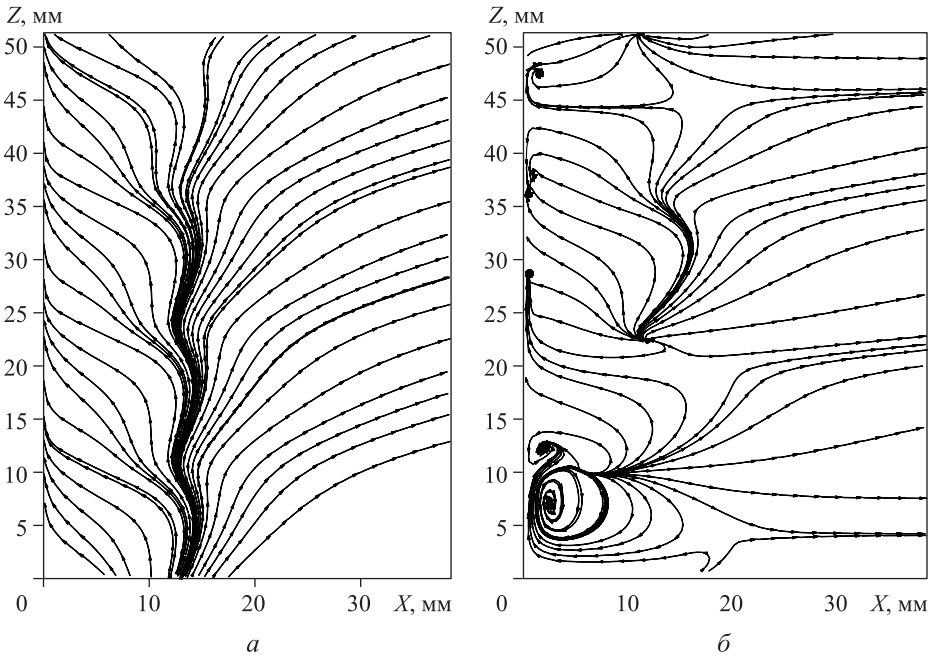


Рис. 2. Линии тока вблизи боковой стенки камеры сгорания (а, б — см. рис. 1)

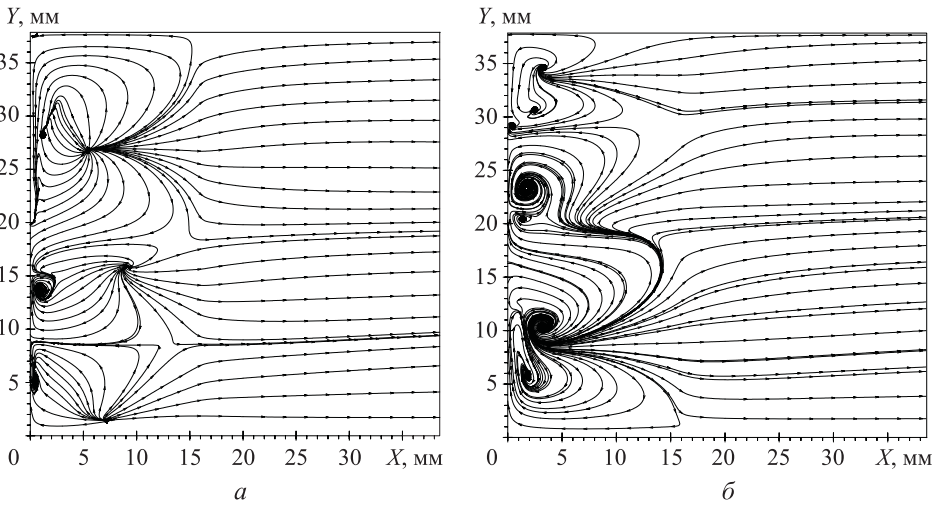
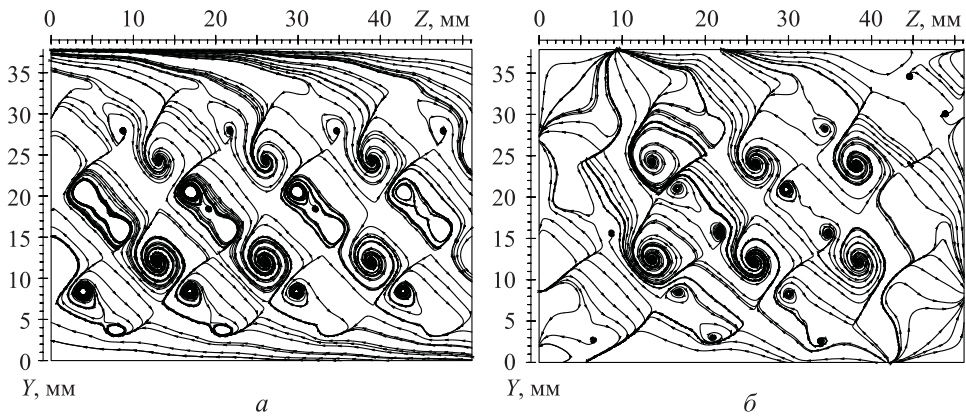


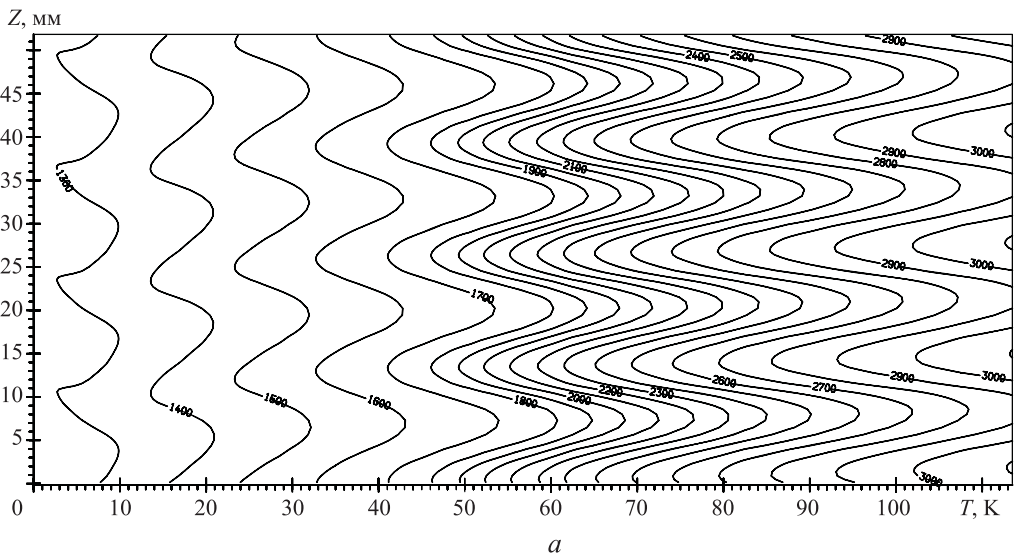
Рис. 3. Проекция линий тока в сечении XY (около плоскости левой (а) и правой (б) перегородок камеры сгорания)

поверхностей перегородки (см. рис. 3). Возмущения, внесенные перегородками в структуру потока на начальном участке, существенно сказываются и ниже по потоку, что хорошо видно на проекциях линий тока в поперечных сечениях камеры на расстоянии  $x_i$  от огневого днища (см. рис. 4). В частности, даже на расстояниях более 80 мм от огневого днища монотонная структура течения у боковой стенки камеры не восстанавливается — в потоке присутствуют поверхности стекания и растекания газа.



**Рис. 4.** Проекция линий тока в сечении  $ZY$  (перпендикулярно продольной оси камеры сгорания),  $x_i = 15$  мм ( $a, б$  — см. рис. 1)

Взаимодействие рассмотренных особенностей процесса течения со смешением и горением топлива в турбулентном режиме приводит к перестройке температурного поля в камере сгорания (рис. 5). Если в ядре потока распределения температур в камерах сгорания обоих вариантов различаются незначительно, то у боковой стенки камеры наблюдается очень сильное изменение температуры, вызванное установкой перегородок. Произошел резкий подъем температуры напротив форсунки, установленной у левой перегородки ( $z \sim 5$  мм), а у противоположной перегородки температура снизилась. Следует отметить, что расчеты специально проводили без введения завесного охлаждения боковой стенки камеры, чтобы наблюдать влияние перегородок на процессы в пристеночной зоне.



**Рис. 5 (начало).** Изотермы у боковой стенки камеры сгорания ( $a$  — см. рис. 1)

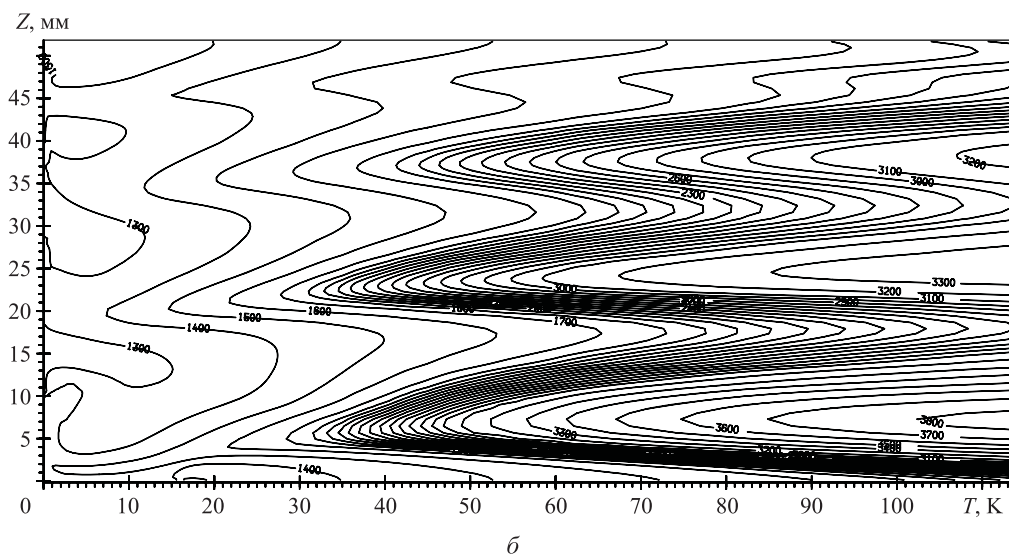


Рис. 5 (окончание). Изотермы у боковой стенки камеры сгорания (б — см. рис. 1)

**Выводы.** 1. Проведено расчетное исследование влияния антипульсационных перегородок на структуру стационарного рабочего процесса в камере сгорания кислородно-керосинового двигателя со струйно-центробежными газожидкостными форсунками с помощью разработанных методов численного моделирования двухфазных осесимметричных и трехмерных турбулентных течений с горением.

2. Показано, что установка перегородок в камерах сгорания со струйно-центробежными форсунками может приводить к возникновению зон с повышенной температурой в угловой зоне между боковой стенкой и радиальной перегородкой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сидлеров Д.А. Численное моделирование газокпельных турбулентных течений с горением (Combust-LF) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008610282, дата регистрации 2007.
2. Сидлеров Д.А. Численное моделирование трехмерных газозфазных турбулентных течений с горением в камерах сгорания ЖРД (LRE flame-3D) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614904, дата регистрации 2010.
3. Gutheil E., Schlots D., et al. Numerical approaches to spray combustion // 4th Symposium on Liquid Space Propulsion. DLR/Lmp. Germany. March 13–15, 2000.
4. Tucker P.K., Shee W., et al. A global optimization methodology for GO<sub>2</sub>/GH<sub>2</sub> single element injector design // 4th Symposium on Liquid Space Propulsion. DLR/Lmp. Germany. March 13–15, 2000.
5. Новиков А.В., Ягодников Д.А., Буркальцев В.А., Лапицкий В.И. Математическая модель и расчет характеристик рабочего процесса в камере сгорания ЖРД малой тяги на ком-

- понентах топлива метан–кислород // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2004. Спец. вып. «Теория и практика современного ракетного двигателестроения». С. 8–17.
6. Ruiz A. Unsteady numerical simulations of transcritical turbulent combustion in liquid rocket engines. PhD, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2012.
7. Yue Chun-guo, Chang Xin-long, Yang Shu-jun, Zhang You-hong. Numerical simulation of interior flow field of a variable thrust rocket engine // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 186. P. 215–219. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.186.215 URL: <https://www.scientific.net/AMR.186.215>
8. Wang Zhen-guo. Internal combustion processes of liquid rocket engines: modeling and numerical simulations // National Defense Industry Press. 2016. DOI: 10.1002/9781118890035 URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9781118890035;jsessionid=608EB60A578C8FD11FA183AA2927A569.f03t03>
9. Строчак Е.А., Боровик И.Н. Численное моделирование процесса распыливания керосина центробежной форсункой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 3. С. 37–54. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-37-54
10. Kalmykov G.P., Larionov A.A., Sidlerov D.A., Yanchilin L.A. Numerical simulation and investigation of working process features in high-duty combustion chambers // Journal of Engineering Thermophysics. 2008. Vol. 17. No. 3. P. 196–217.
11. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 148 с.
12. Kalmykov G.P., Larionov A.A., Sidlerov D.A., Yanchilin L.A. Numerical simulation of operational processes in the combustion chamber and gas generator of oxygen-methane liquid rocket engine. EUCASS book Progress in Propulsion Physics, Torus press, 2009.
13. Мосолов С.В., Сидлеров Д.А., Пономарев А.А., Смирнов Ю.Л. Расчетное исследование особенностей рабочего процесса в камерах сгорания ЖРД, работающих на топливе кислород + углеводороды // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=33406>
14. Мосолов С.В., Сидлеров Д.А., Пономарев А.А. Сравнительный анализ особенностей рабочего процесса в камерах сгорания ЖРД со струйно-струйными и струйно-центробежными форсунками на основе численного моделирования // Труды МАИ. 2012. № 59. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=34989>
15. Сидлеров Д.А., Пономарев А.А. Численное моделирование режимов испарения и горения капельных струй топлива в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей // Труды МАИ. 2014. № 77. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=53138&eng=N>
16. Мосолов С.В., Сидлеров Д.А. Анализ особенностей рабочего процесса в камерах сгорания ЖРД со струйно-центробежными и центробежно-центробежными форсунками // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 2. С. 60–71. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-2-60-71

**Мосолов Сергей Владимирович** — канд. физ.-мат. наук, начальник отделения жидкостных ракетных двигателей ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша» (Российская Федерация, 125438, Москва, Онежская ул., д. 8).

**Сидлеров Дмитрий Анатольевич** — д-р техн. наук, начальник отдела ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша» (Российская Федерация, 125438, Москва, Онежская ул., д. 8).

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

Мосолов С.В., Сидлеров Д.А. Исследование влияния антипульсационных перегородок на развитие рабочего процесса в камере сгорания кислородно-керосинового ЖРД с форсунками струйно-центробежного типа методом численного моделирования // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 2. С. 44–53.

DOI: 10.18698/0236-3941-2017-2-44-53

**INVESTIGATION OF ANTIPULSATION PARTITIONS INFLUENCE ON THE WORKING PROCESS DEVELOPMENT IN OXYGEN-KEROSENE LRE COMBUSTION CHAMBER WITH JET-CENTRIFUGAL INJECTORS BY NUMERICAL SIMULATION**

S.V. Mosolov

mosolov@list.ru

D.A. Sidlerov

sidlerov@rambler.ru

**Keldysh Research Centre, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

The study focuses on computational investigation of antipulsation partitions influence on the steady-state working process structure in oxygen-kerosene LRE combustion chamber with jet-centrifugal injectors. We examined two variants of chambers with identical injector arrangement. The first variant of chamber has no partitions, and thin partitions are mounted on the injector head of the second variant. Findings of the research show that installation of partitions in chambers with jet-centrifugal injectors may lead to increased temperature zone appearance in the corner between the side chamber wall and radial partition

---

**Keywords**

*Liquid rocket engine, combustion chamber, numerical simulation, fuel burning*

**REFERENCES**

- [1] Sidlerov D.A. Chislennoe modelirovanie gazokapel'nykh turbulentnykh techeniy s goreniiem (Combust-LF) [Numerical simulation of gas-droplet turbulent flow with combustion (Combust-LF)]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2008610282 [Registration certificate of computer program no. 2008610282], registered in 2007.
- [2] Sidlerov D.A. Chislennoe modelirovanie trekhmernykh gazofaznykh turbulentnykh techeniy s goreniiem v kamerakh sgoraniya ZhRD (LRE flame-3D) [Numerical simulation of 3D gas-phase turbulent flows with combustion in liquid propellant system combustor (LRE flame-3D)]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2010614904 [Registration certificate of computer program no. 2010614904], registered in 2010.
- [3] Gutheil E., Schlots D., et al. Numerical approaches to spray combustion. *4th Symposium on Liquid Space Propulsion*. DLR/Lmp., Germany, March 13–15, 2000.



- [4] Tucker P.K., Shee W., et al. A global optimization methodology for GO<sub>2</sub>/GH<sub>2</sub> single element injector design. *4th Symposium on Liquid Space Propulsion*. DLR/Lmp., Germany, March 13–15, 2000.
- [5] Novikov A.V., Yagodnikov D.A., Burkal'tsev V.A., Lapitskiy V.I. Mathematical model and calculates the performance of the workflow in the combustion chamber rocket engine thrusters on the components of the methane-oxygen fuel. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost. Spets. vyp. "Teoriya i praktika sovremennogo raketnogo dvigatelestroeniya"* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng., Spec. Iss. "Theory and practice of modern rocket propulsion engineering"], 2004, pp. 8–17.
- [6] Ruiz A. Unsteady numerical simulations of transcritical turbulent combustion in liquid rocket engines. PhD, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2012.
- [7] Yue Chun-guo, Chang Xin-long, Yang Shu-jun, Zhang You-hong. Numerical simulation of interior flow field of a variable thrust rocket engine. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 186, pp. 215–219. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.186.215  
Available at: <https://www.scientific.net/AMR.186.215>
- [8] Wang Zhen-guo. Internal combustion processes of liquid rocket engines: modeling and numerical simulations. National Defense Industry Press. 2016. DOI: 10.1002/9781118890035  
Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9781118890035;jsessionid=608EB60A578C8FD11FA183AA2927A569.f03t03>
- [9] Strokach E.A., Borovik I.N. Numerical simulation of kerosene dispersion process by the centrifugal atomizer. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 3, pp. 37–54.  
DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-37-54
- [10] Kalmykov G.P., Larionov A.A., Sidlerov D.A., Yanchilin L.A. Numerical simulation and investigation of working process features in high-duty combustion chambers. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, vol. 17, no. 3, pp. 196–217.
- [11] Patankar S. Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti [Numerical solution of heat exchange and fluid dynamics problems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 148 p.
- [12] Kalmykov G.P., Larionov A.A., Sidlerov D.A., Yanchilin L.A. Numerical simulation of operational processes in the combustion chamber and gas generator of oxygen-methane liquid rocket engine. EUCASS book Progress in Propulsion Physics, Torus press, 2009.
- [13] Mosolov S.V., Sidlerov D.A., Ponomarev A.A., Smirnov Yu.L. Numerical research on the peculiarities of the operational process in LRE combustion chambers propelled by oxygen and hydrocarbons. *Trudy MAI*, 2012, no. 58. Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=33406>
- [14] Mosolov S.V., Sidlerov D.A., Ponomarev A.A. Comparative analyses of the peculiarities of the operational process in LRE combustion chambers with coaxial-jet and jet-centrifugal injectors using numerical simulation. *Trudy MAI*, 2012, no. 59. Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=34989>
- [15] Sidlerov D.A., Ponomarev A.A. Numerical simulation of fuel droplets evaporation and combustion regimes in the combustion chambers of liquid rocket engines. *Trudy MAI*, 2014, no. 77. Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=53138&eng=N>

[16] Mosolov S.V., Sidlerov D.A. Analysis of the characteristic features of operational process in liquid rocket engine combustion chamber with jet-centrifugal and centrifugal-centrifugal injectors. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 2, pp. 60–71.

DOI: 10.18698/0236-3941-2016-2-60-71


**Mosolov S.V.** — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Head of Liquid Rocket Engines Department, Keldysh Research Centre (Onezhskaya ul. 8, Moscow, 125438 Russian Federation).

**Sidlerov D.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Head of Subdepartment of Keldysh Research Centre (Onezhskaya ul. 8, Moscow, 125438 Russian Federation).

### Please cite this article in English as:

Mosolov S.V., Sidlerov D.A. Investigation of Antipulsation Partitions Influence on the Working Process Development in Oxygen-Kerosene LRE Combustion Chamber with Jet-Centrifugal Injectors by Numerical Simulation. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 2, pp. 44–53.

DOI: 10.18698/0236-3941-2017-2-44-53



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие  
автора **Л.Н. Лысенко**

**«Наведение баллистических ракет»**

Изложены научные и методологические основы наведения баллистических ракет. Рассмотрены вопросы программирования движения (задачи наведения) и информационно-навигационного обеспечения управления (задачи навигации), а также проблемы определения точности стрельбы (задачи оценки точности возмущенного движения). Показаны направления решений соответствующих задач при создании ракетных комплексов тактического, оперативно-тактического и стратегического назначения, возможные пути совершенствования баллистико-навигационного обеспечения полета ракет указанных классов.

Содержание пособия соответствует курсу лекций, читаемых в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических вузов, слушателей военных академий, а также аспирантов, инженеров и научных работников, специализирующихся в области баллистики, динамики полета и управления движением летательных аппаратов.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
+7 (499) 263-60-45  
press@bmstu.ru  
www.baumanpress.ru