

УДК 621.454.2, 533, 519.63

Сравнительный анализ особенностей рабочего процесса в камерах сгорания ЖРД со струйно-струйными и струйно-центробежными форсунками на основе численного моделирования

С.В. Мосолов, Д.А. Сидлеров, А.А. Пономарев

Аннотация

Исследовано влияние взаимодействия истекающих из форсунок струй на процессы течения, смесеобразования и горения топлива в модельных многофорсуночных камерах сгорания с помощью методов численного моделирования, разработанных в ГИЦ ФГУП «Центр Келдыша». Рассмотрены модельные камеры с концентрическим расположением струйно-струйных и струйно-центробежных форсунок, работающие по схеме газ-жидкость на топливе кислород + углеводороды (керосин).

Ключевые слова

камера сгорания; жидкостный ракетный двигатель; численное моделирование.

Введение

Камера сгорания жидкостного ракетного двигателя является одной из наиболее сложных с точки зрения разработки и изучения технических систем. Основные трудности при рассмотрении такой системы связаны с существованием многочисленных зон, отличающихся друг от друга характером протекающих в них процессов, которые имеют различные пространственные и временные масштабы в пределах одной и той же физической области объема. Зоны примыкают друг к другу, и процессы, протекающие в этих зонах, тесно связаны между собой. Например, в зоне инъекции основными особенностями являются двухфазный характер течения газа и жидкости, наличие рециркуляционных зон, большая величина напряжения трения и значительные градиенты давления. Определяющими процессами являются распад жидких струй и образование капель, взаимодействие между каплями и взаимодействие жидкости со стенками. Однако на небольшом расстоянии от форсунки доминирующими характеристиками потока становятся резкие градиенты концентрации вблизи капли, турбулентное перемешивание и турбулентная диффузия, двухфазность потока, состоящего из газа и капель. Важнейшими процессами становятся

движение, испарение и нагрев жидкой капли. Область воспламенения смеси горючего и окислителя характеризуется большими тепловыми потоками, большим числом компонентов в смеси и ростом ее температуры. Основными процессами здесь являются кинетические и равновесные химические реакции, диффузия компонентов смеси. Для изучения поведения таких сложных физических систем, как камеры сгорания ЖРД, может быть использовано численное моделирование. Для того чтобы дать количественно правильные предсказания, моделирование должно описывать как отдельные процессы, действующие в системе, так и их взаимодействие.

Расчеты рабочего процесса проводились с помощью разрабатываемого в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» метода численного моделирования 3-х мерных турбулентных течений с горением [1,2]. Для описания процессов используется система уравнений типа Навье-Стокса с двухпараметрической $k-\epsilon$ моделью турбулентности. Скорость горения рассчитывается с помощью комбинированной модели, учитывающей процесс размыва турбулентных вихрей и химическое взаимодействие горючего и окислителя по обобщенному уравнению аррениусового типа. Система уравнений в частных производных дискретизируется методом контрольного объема и численно интегрируется алгоритмом типа SIMPLER [3,4]. Этот метод численного моделирования используется для исследований газодинамических и теплофизических процессов в камерах сгорания и газогенераторах, работающих на разнообразных компонентах топлива со смесительными элементами различных типов.

Рассмотрим результаты исследования рабочего процесса в модельной камере сгорания кислородно-керосиновой двигателя, работающего по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа. На смесительной головке камеры сгорания могут использоваться соосные газожидкостные струйно-струйные или струйно-центробежные (жидкий керосин подается через тангенциальные отверстия с закруткой). Через центральный канал подается окислительный генераторный газ, а через внешний кольцевой канал – пелена керосина.

Сравнительное исследование особенностей рабочего процесса в камерах с соосными струйно-струйными и струйно-центробежными форсунками

Рассмотрим результаты численного моделирования рабочего процесса в трехмерной постановке для модельной 7-форсуночной камеры сгорания цилиндрической формы, которая имеет смесительную головку с концентрическим расположением струйно-центробежных или струйно-струйных форсунок. Схема расположения форсунок приведена на рис. 1.

Расчеты процессов распыла, испарения, смешения и горения компонентов топлива внутри форсунок проводились в осесимметричном приближении. Полученные результаты использовались в качестве граничных условий для задания распределений параметров потока (скоростей, концентраций, энтальпии, температуры, k , ϵ и т.д.) в сечении днища смесительной головки ($x=0$) при проведении трехмерных расчетов.

Схема расчетной области и дискретной сетки приведена на рис. 1. Значение $x=0$ соответствует плоскости огневого днища форсуночной головки. При данной схеме расположения форсунок течение в камере сгорания имеет периодическую структуру по направлению угла Θ с шагом 60° . При проведении расчетов сечения, в которых ставились периодические граничные условия, располагались посередине между форсунками, т.е. полагалось, что $\Phi_{(\Theta=-30^\circ)} = \Phi_{(\Theta=30^\circ)}$, где Φ – любой параметр потока.

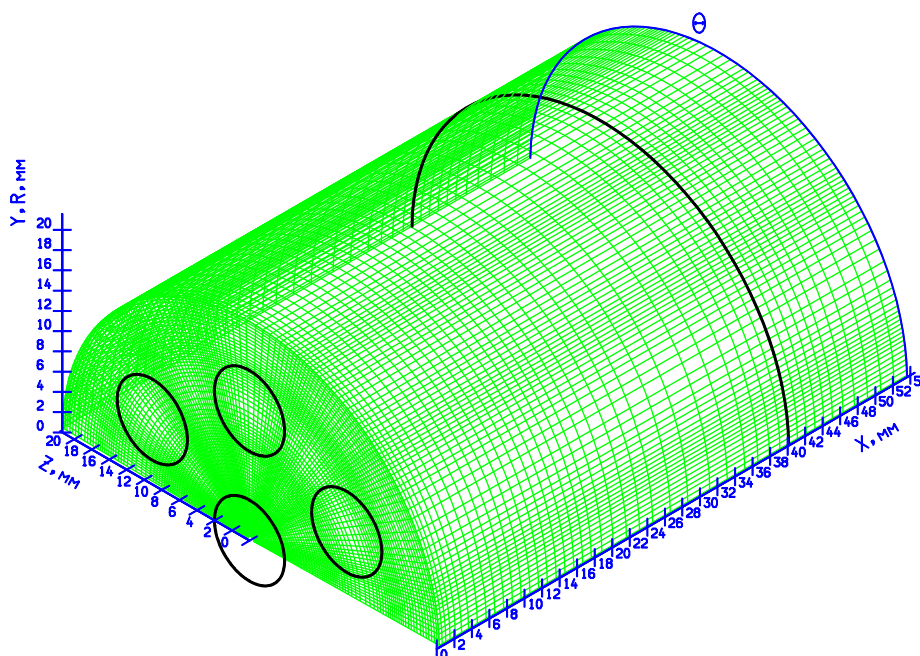


Рис. 1. Фрагмент расчетной области и сетки

Рассмотрим особенности рабочего процесса в камерах со струйно-струйными и струйно-центробежными форсунками.

Камера со струйно-струйными форсунками. Результаты расчетов приведены на рис. 2 (Ia, IIa), рис. 3 (Ia, IIa, IIIa), рис. 4 (Ia, IIa, IIIa), рис. 5. Общая структура потока, образующегося при истечении струй из каналов форсунок, их взаимодействии и догорании в объеме камеры сгорания, видна на пространственной картине линий тока. Более подробная структура течения на начальном участке изображена на проекциях линий тока в поперечных сечениях внутреннего объема камеры. Отметим сложную структуру рециркуляционной зоны, примыкающей к огневому днищу, в частности: 1) мощный поперечный поток,

проходящий между форсунками периферического ряда и простирающийся от центральной форсунки до боковой стенки; 2) парные вихри у боковой стенки камеры (рис. 2 (Па), сечение 11 мм); 3) поверхности растекания и стекания газа в плоскости, проходящей через осевые линии центральной и периферической форсунок.

Ниже по потоку от рециркуляционной зоны продолжается растекание внешних частей струй, обогащенных парами керосина, в радиальном и тангенциальном направлениях. Это приводит к перетеканию в пристеночную область, расположенную напротив выходных сечений форсунок ($\Theta \sim 0^\circ$, $Z \sim 0$), газа с более высокими соотношениями компонентов и температурой из срединных участков струй (рис. 4). Распределения концентраций и температур у боковой стенки камеры очень неравномерны, начиная с сечения $x \sim 20$ мм. Максимум температур у боковой стенки расположен напротив форсунок, а минимум между форсунками.

Камера со струйно-центробежными форсунками. Результаты расчетов приведены на рис. 2 (Iб, IIб), рис. 3 (Iб, IIб, IIIб), рис. 4 (Iб, IIб, IIIб), рис. 6. В данном варианте струи, истекающие в камеру сгорания из струйно-центробежных форсунок, имеют закрутку. Общая структура течения видна на пространственной картине линий тока (рис. 2). Подробности течения на начальном участке изображены на проекциях линий тока в поперечных сечениях внутреннего объема камеры. При взаимодействии закрученных струй формируется более сложная картина течения, чем в предыдущем варианте. Можно выделить следующие основные отличительные особенности. Вследствие закрутки первоначально круговые на выходе из форсунок струи испытывают деформацию растяжения-сжатия во взаимно перпендикулярных направлениях (см., например, рис. 4). У дна камеры на боковых границах струй образуются вихри (рис. 2 (IIб) сечение 1,5 мм). Благодаря закрутке у боковой стенки камеры формируется слой газа, текущий в окружном направлении (рис. 2, 3). Вследствие этого, распределения концентраций и температур вблизи боковой стенки в тангенциальном направлении более равномерны, чем в варианте без закрутки (рис. 6).

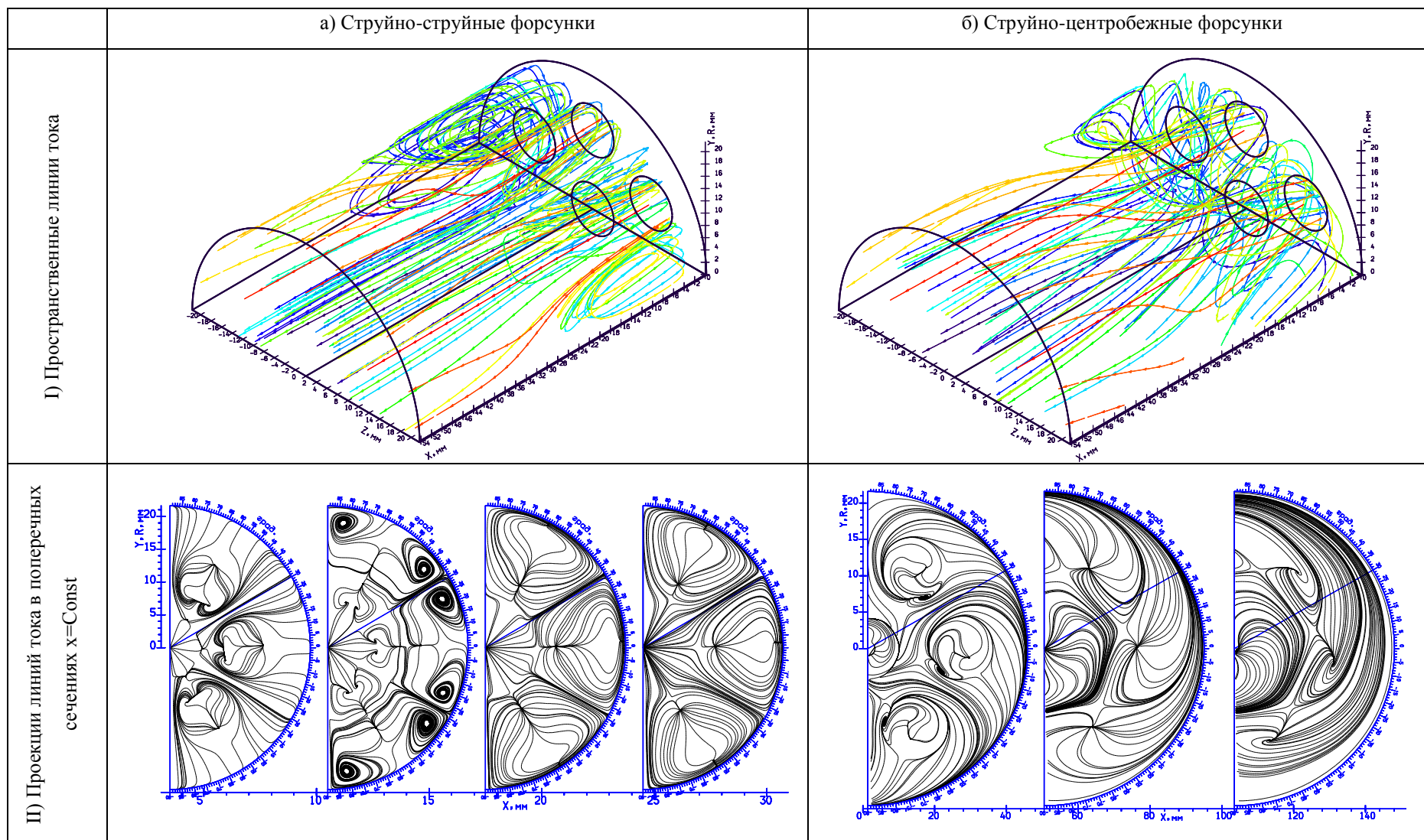


Рис. 2. Пространственные линии тока и проекции линий тока в поперечных сечениях $x=Const$ для камер сгорания со струйно-струйными и струйно-центробежными форсунками

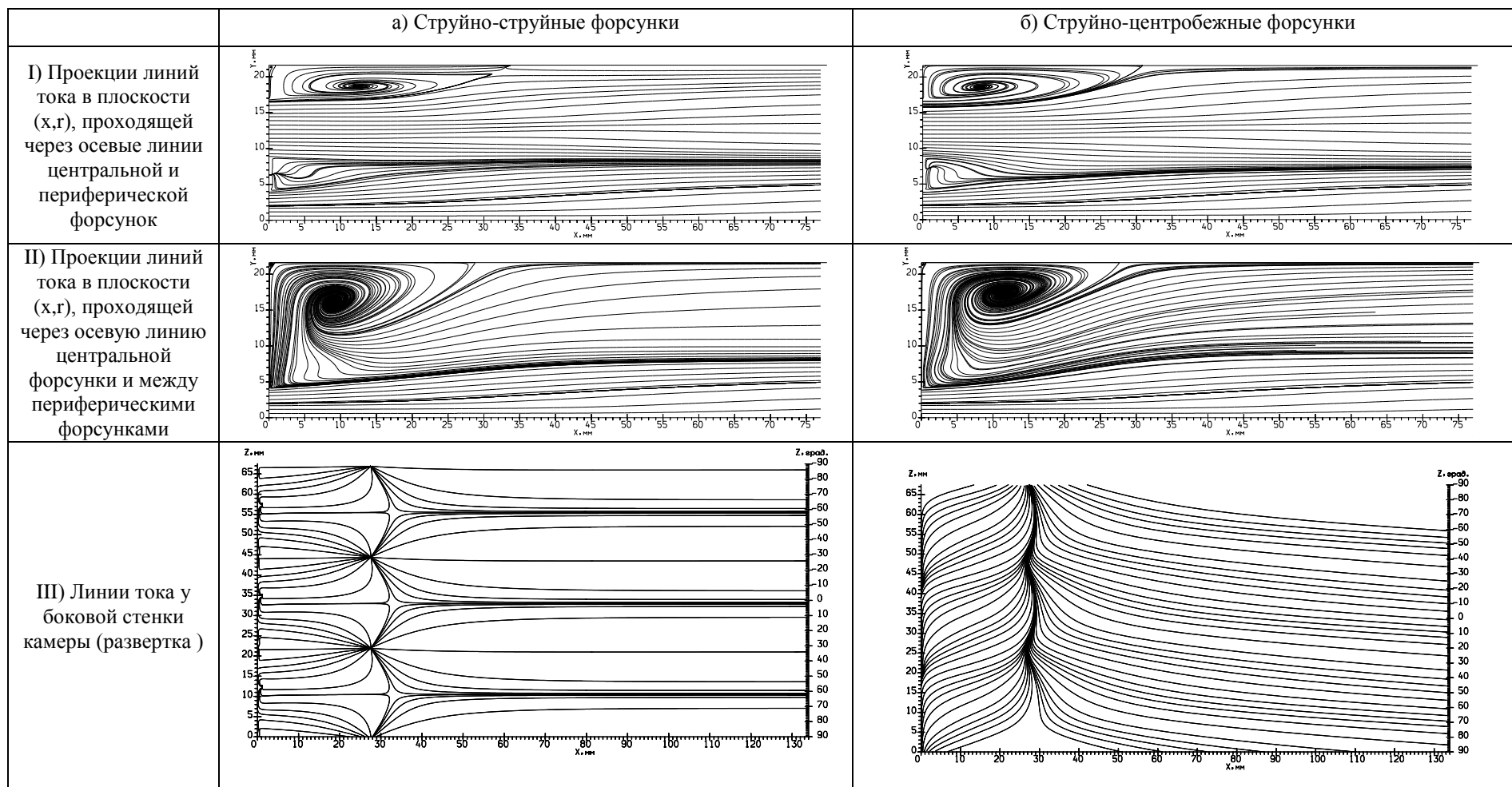


Рис. 3. Проекция линий тока в продольных сечениях и у боковой стенки камер сгорания со струйно-струйными и струйно-центробежными форсунками

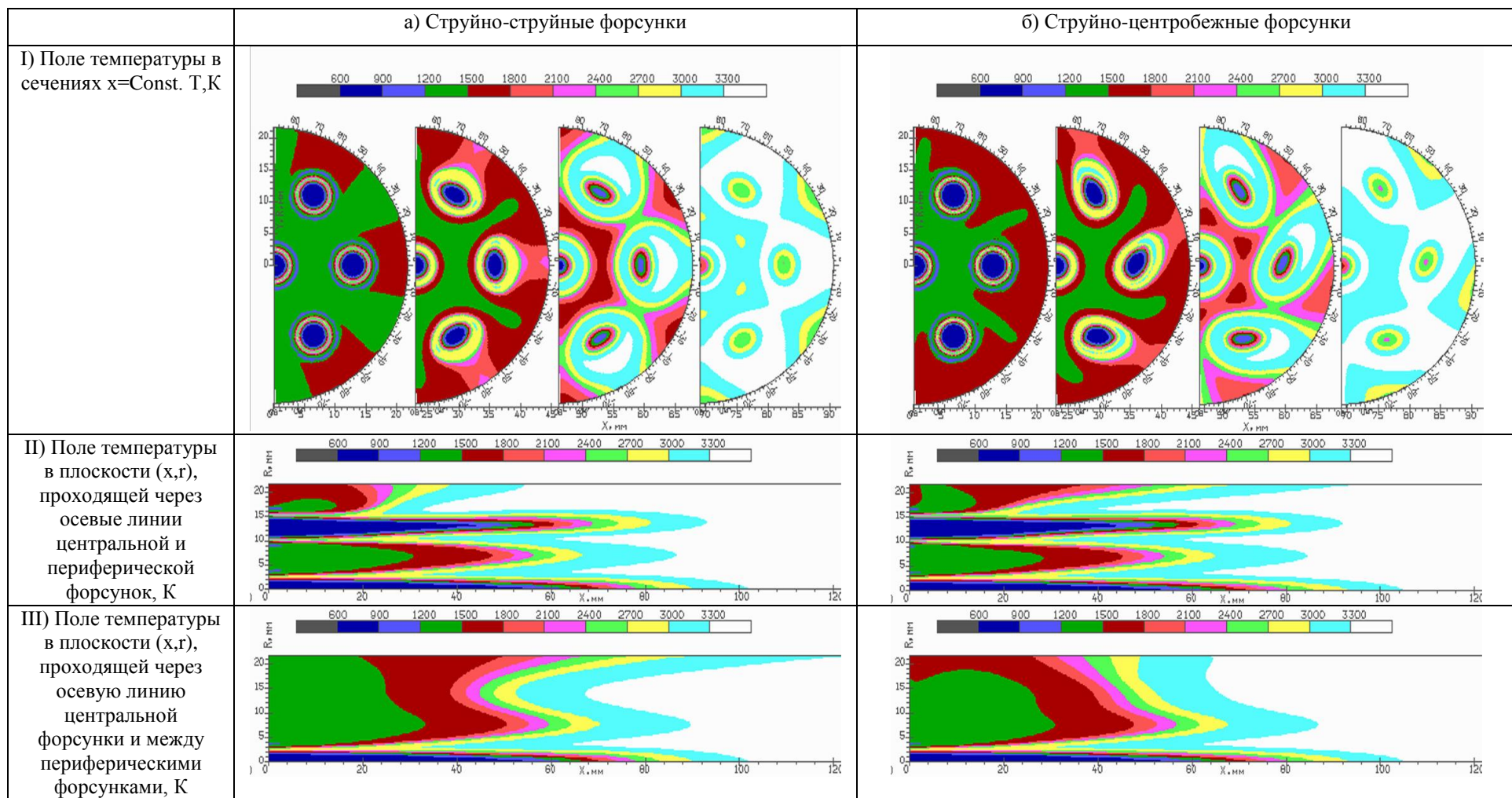


Рис. 4. Поля температуры для камер сгорания со струйно-струйными и струйно-центробежными форсунками

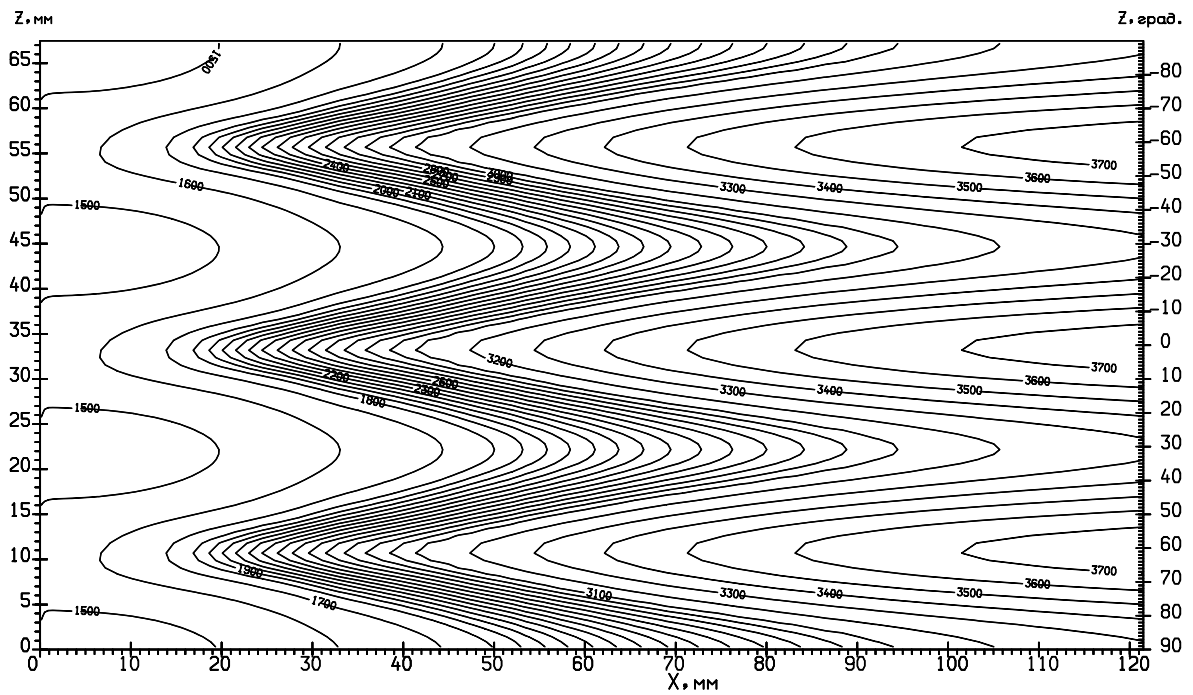


Рис. 5. Изотермы у боковой стенки камеры сгорания со струйно-струйными форсунками

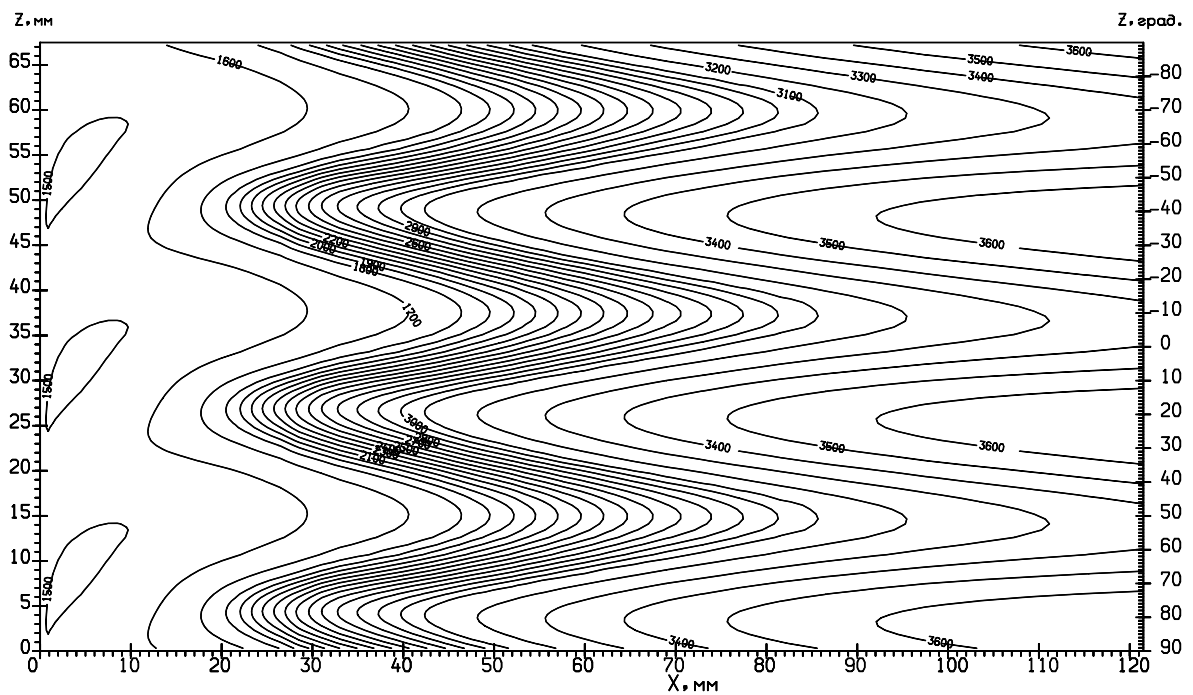


Рис. 6. Изотермы у боковой стенки камеры сгорания со струйно-центробежными форсунками

Выводы

Методом численного моделирования, разработанным в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», исследованы особенности рабочего процесса в модельных камерах сгорания ЖРД с соосными двухкомпонентными струйно-струйными и струйно-центробежными форсунками.

Исследовано влияние закрутки выходящего из форсунки потока на процессы течения, смесеобразования и горения в камере. При наличии закрутки процессы смешения активизируются, и сокращается протяженность зоны интенсивного выгорания топлива, при этом уменьшается неравномерность состава и температуры вдоль боковой стенки камеры в тангенциальном направлении по сравнению с вариантом «без закрутки».

Библиографический список

1. Kalmykov G.P., Larionov A.A., Sidlerov D.A., Yanchilin L.A. Numerical Simulation of the Working Process in Gas Generator Working on Propellant Components LOX + Gaseous Methane // Publications of the 1st EUCASS conference, Moscow, 2005, <http://www.onera.fr/eucass/2005/Proceedings/5.06.04.pdf>.
2. Kalmykov G.P., Larionov A.A., Sidlerov D.A., and Yanchilin L.A. Numerical Simulation and Investigation of Working Process Features in High-Duty Combustion Chambers //Journal of Engineering Thermophysics, Vol. 17, No. 3, 2008, pp. 196–217.
3. Pantankar S. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980.
4. Gosman A.D., Ioannides E. Aspects of Computer Simulations of Liquid-Fuelled Combustors// AIAA Paper 81-0323, 1981.

Сведения об авторах

Мосолов Сергей Владимирович, начальник отделения жидкостных ракетных двигателей ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша", к.ф.-м.н., тел.: +7 495 456-64-82, e-mail: kerc@elnet.msk.ru

Сидлеров Дмитрий Анатольевич, начальник отдела ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша", д.т.н., тел.: +7 915 470-33-89, e-mail: sidlerov@rambler.ru

Пономарев Александр Александрович, научный сотрудник ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша", к.ф.-м.н., тел.: +7 916 577-82-42, e-mail: ponomar_aa@mail.ru