

УДК 621.454.2, 533, 519.63

Расчетное исследование особенностей рабочего процесса в камерах сгорания ЖРД, работающих на топливе кислород + углеводороды

С.В. Мосолов, Д.А. Сидлеров, А.А. Пономарев, Ю.Л. Смирнов

Аннотация

С помощью метода численного моделирования двухфазных турбулентных течений с горением, разработанного в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», исследованы особенности рабочего процесса в модельных камерах сгорания ЖРД, работающих на топливе кислород + углеводороды (керосин). Рассмотрены камеры со струйно-центробежными форсунками, работающие по схеме газ-жидкость. Изучено влияние конструктивных и режимных параметров смесительных элементов на процессы течения, смесеобразования и горения.

Ключевые слова

камера сгорания, жидкостный ракетный двигатель, численное моделирование.

Введение

Компоненты топлива кислород + углеводороды традиционно используются в космической ракетной технике среднего и тяжелого классов. Наиболее известны такие российские ракеты-носители (РН), как Р-7 и ее модификации, «Зенит», «Энергия», «Ангара», а также разработанные в США РН серий «Сатурн» и «Атлас», на которых устанавливаются кислородно-керосиновые двигатели РД-107/108, РД-170/171, РД-120, РД-191, РД-0124, Н-1, F-1, РД-180 и др.

В российских жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) форсунки с закруткой одного или обоих компонентов топлива на входе в камеру сгорания используются в качестве мощного средства воздействия на протекание рабочего процесса [1, 2]. Закрутка может радикальным образом влиять на поле течения. Такие важные его характеристики, как распыл жидкого топлива, распространение, взаимодействие и затухание струй, эжекция вещества струей, размеры и форма зоны горения существенно зависят от степени закрутки, сообщенной потоку.

В ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» ведется разработка методов и компьютерных программ численного моделирования рабочего процесса в камерах сгорания и

газогенераторах ЖРД. В данной области достигнуты значительные успехи [3, 4]. Разработаны математическая модель, численный метод и компьютерные программы для расчетного моделирования двухфазных осесимметричных и трехмерных турбулентных течений с горением в камерах сгорания и газогенераторах ЖРД. Математическая модель включает уравнения типа Навье-Стокса и $k-\epsilon$ модель турбулентности. Скорость горения определяется по модели размыва турбулентных вихрей и по обобщенному уравнению химической кинетики аррениусового типа. Расчет движения, прогрева, испарения и дробления капель жидкого горючего и окислителя проводится в подходе Лагранжа. 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 [5], а обыкновенные дифференциальные уравнения для дискретной (капельной) фазы интегрируются методом Рунге-Кутты [6].

Данный метод широко используется для численного моделирования рабочего процесса в модельных и натурных камерах сгорания, имеющих смесительные элементы разнообразных типов и работающих на различных компонентах топлива.

Результаты численного моделирования рабочего процесса

Рассмотрим основные результаты численного моделирования рабочего процесса в модельной камере, работающей на кислородно-керосиновом топливе по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа. На смесительной головке данной камеры сгорания используются соосные газожидкостные струйно-центробежные форсунки с заглублением центрального канала. Через центральный канал подается окислительный генераторный газ, а через внешний кольцевой канал – закрученная пелена керосина (рис. 1). Геометрические размеры выходного участка форсунки указаны на рис. 2-4.

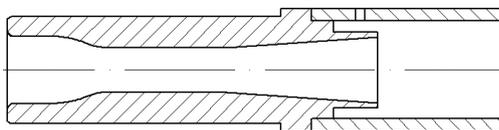


Рис. 1. Схема соосной газожидкостной форсунки

При строгой постановке задачи численного моделирования рабочего процесса в многофорсуночной камере требуется применение трехмерного подхода. Однако задачу можно решить также и в упрощенной осесимметричной постановке. Течение внутри канала форсунки рассматриваемого типа может считаться осесимметричным. При равномерном

распределении двухкомпонентных соосных форсунок по смесительной головке ядро потока в камере сгорания в соответствии с расположением форсунок может быть разбито на ряд повторяющихся элементов. Картина течения в каждом таком отдельном элементе при относительно слабой закрутке близка к осесимметричной и дает достаточно полное представление о процессе во всем объеме ядра потока в камере сгорания. Адекватность такого подхода подтверждена трехмерными расчетами [7].

В осесимметричной постановке расчетная область включала в себя внутренний объем форсунки и элемент ядра потока, соответствующий единичной форсунке. Канал генераторного газа может быть простым цилиндрическим или профилированным. Высокоскоростной поток кислородного генераторного газа активно взаимодействует с пеленой жидкого керосина внутри форсунки. Для расчета скорости распыла пелены и диаметра образующихся капель использованы данные работы [8], на основании которых получено, что пелена керосина должна распыляться внутри форсуночного канала на длине около 8 мм, а средний диаметр капель не превышает 20 мкм. Интенсивность турбулентности на входе принималась 10%, масштаб турбулентности 0,1 радиуса канала форсунки.

Заглубление канала генераторного газа оказывает существенное воздействие на процессы смешения и выгорания горючего и окислителя. Проведенные расчеты показали, что используемая система уравнений может иметь два стационарных численных решения, одно из которых соответствует стабилизации пламени в основном объеме камеры сгорания на обратных токах у огневого днища, а другое – стабилизации пламени в канале форсунки за кромкой перегородки, разделяющей газовую и жидкостную ступени форсунки, на пелене распыляемого керосина. Возможность реализации одного из режимов стабилизации при работе натурной камеры сгорания зависит от химико-кинетических свойств и температур компонентов топлива, скоростей подачи, особенностей конструкции смесительных элементов, процесса зажигания камеры и др. Учет некоторых из этих обстоятельств в расчете весьма проблематичен, и задача достоверной идентификации режима стабилизации без привлечения информации, полученной при огневых испытаниях камер двигателей, пока не может считаться решенной. Ряд экспериментальных данных косвенным образом указывают на то, что в рассматриваемых условиях наиболее вероятен режим стабилизации горения внутри форсунки. Все представленные результаты расчетов, кроме одного специально оговоренного, соответствуют этому режиму стабилизации.

Рассмотрим результаты расчетов рабочего процесса в струйно-центробежной форсунке и элементе камеры сгорания при профилированном канале генераторного газа с различными величинами заглубления $h = 4,3; 13,5; 17$ мм.

Заглубление $h=4,3$ мм. Результаты расчетов приведены на рис. 2 (Ia, Ib), рис. 3(Ia). В данном случае процесс взаимодействия пелены жидкого керосина с потоком генераторного газа начинается уже в канале форсунки, и на длине заглубления распыляется около половины расхода горючего. Стабилизация пламени происходит на пелене керосина, и процесс горения активно идет в канале форсунки, где газифицируется $\sim 35\%$ керосина. Максимальное значение скорости газа на входе в камеру ~ 150 м/с. Протяженность обратного тока у огневого днища камеры составляет ~ 8 мм, температура в нем ~ 600 К, а соотношение компонентов $K \approx 0,05$. Газификация керосина завершается на длине ~ 9 мм.

Заглубление $h=13,5$ мм. Результаты расчетов приведены на рис. 2 (IIa, IIб), рис. 3 (IIa, IIб), рис. 4 (Ia, Ib). При таком заглублении газового канала керосин полностью распыляется и на 95% газифицируется в канале форсунки. Резкое уменьшение плотности газа во фронте горения внутри форсунки приводит к появлению пика на профиле скорости газа и дополнительной турбулизации потока. Степень смешения и выгорания топлива в канале форсунки, а также уровень турбулентности и максимальная скорость газа на входе в камеру выше, чем в предыдущем варианте. Обратный ток у днища камеры удлинился приблизительно до 11 мм, а соотношение компонентов и температура в нем увеличились: $K_{O.T.} \sim 0,2 \div 0,3$; $T_{O.T.} \sim 1000 \div 1200$ К. Параметры обратного тока имеют важное значение для теплового состояния днища и боковой стенки камеры на начальном участке.

Заглубление $h=17$ мм. Результаты расчетов приведены на рис. 2 (IIIa, IIIб), рис. 3 (IIIa, IIIб), рис. 4 (IIa, IIб). При данной величине заглубления керосин полностью газифицируется в канале форсунки. Степень смешения и выгорания топлива, а также скорость на входе в камеру в данном случае максимальны из всех рассмотренных вариантов. Обратный ток у днища камеры имеет длину ~ 13 мм, а соотношение компонентов и температура в нем: $K_{O.T.} = 0,28 \div 0,35$; $T_{O.T.} = 1200 \div 1300$ К. В данном варианте, по сравнению с другими рассмотренными, полнота сгорания максимальна, а потери характеристической скорости, следовательно, минимальны (см. рис. 5).

Рассмотрим влияние режима стабилизации пламени на параметры рабочего процесса в камере сгорания. Для этого сопоставим результаты расчетов рабочего процесса для форсунки с заглублением газового канала $h=13,5$ мм в режиме стабилизации пламени в камере сгорания на обратных токах у огневого днища (рис. 2 (IVa, IVб), рис. 4 (IIIa, IIIб)) с результатами, полученными для режима стабилизации пламени в канале форсунки (рис. 2 (IIa, IIб), рис. 4 (Ia, Ib)). В случае стабилизации пламени в форсунке на профиле осевой компоненты скорости появляется характерный пик, обусловленный резким падением

плотности и, соответственно, ускорением газового потока во фронте горения. Повышенные градиенты скорости в зоне пика приводят к росту кинетической энергии турбулентности и замедлению роста масштаба турбулентности. Горение внутри форсунки приводит к общему значительному повышению скорости газового потока в канале. Также интенсифицируется процесс газификации горючего. Это в первую очередь связано с двумя процессами. Во-первых, быстрый прогрев капель в потоке с горением приводит к падению коэффициента поверхностного натяжения керосина (вплоть до нуля при достижении критической температуры). Во-вторых, рост скорости газа в канале с горением приводит к увеличению разности скоростей газовой и капельной фаз. Оба этих процесса ведут к интенсивному действию механизма распыла поверхности капель газовым потоком. При этом керосин практически полностью газифицируется внутри форсунки. Если горения в форсунке нет, то механизм распыла поверхности включается в основном после выхода капель в высокотемпературную область камеры сгорания, а внутри форсунки испаряется около 65% горючего. Также в этом случае из-за большей интенсивности турбулентности газа в канале форсунки капли и пары горючего успевают лучше смешаться со струей генераторного газа. Это приводит к уменьшению концентрации горючего и повышению температуры в обратном токе у головки камеры. При стабилизации пламени на обратных токах в камере сгорания резкое уменьшение плотности и падение давления на фронте пламени приводит к замыканию обратного тока на меньшей длине, чем в варианте со стабилизацией в форсунке, и после прохождения зоны интенсивного горения параметры потока имеют в основном более равномерные распределения по сечению. Таким образом, параметры рабочего процесса существенно зависят от режима стабилизации горения.

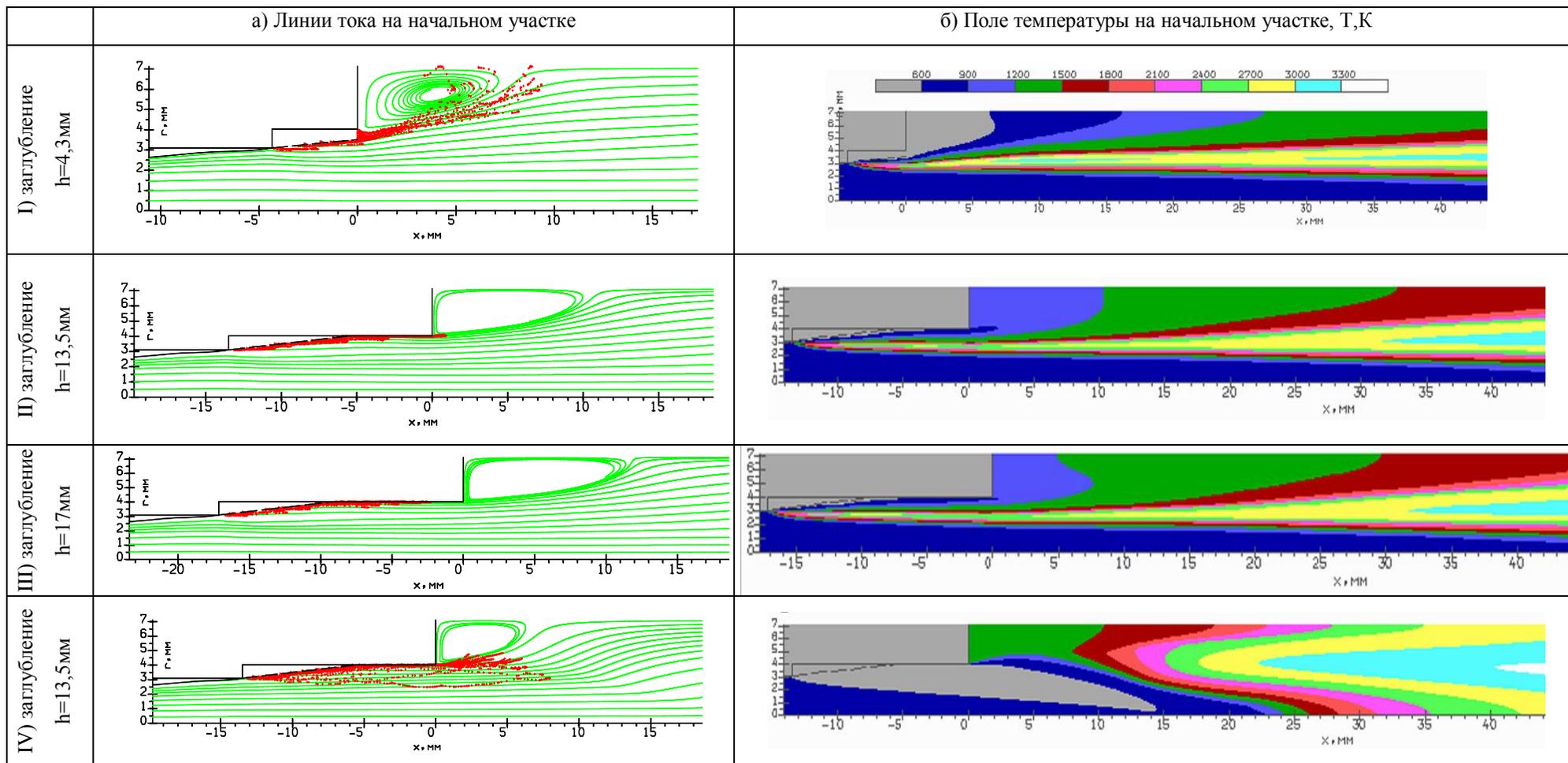


Рис. 2. Линии тока и поля температуры для различных величин заглубления канала генераторного газа

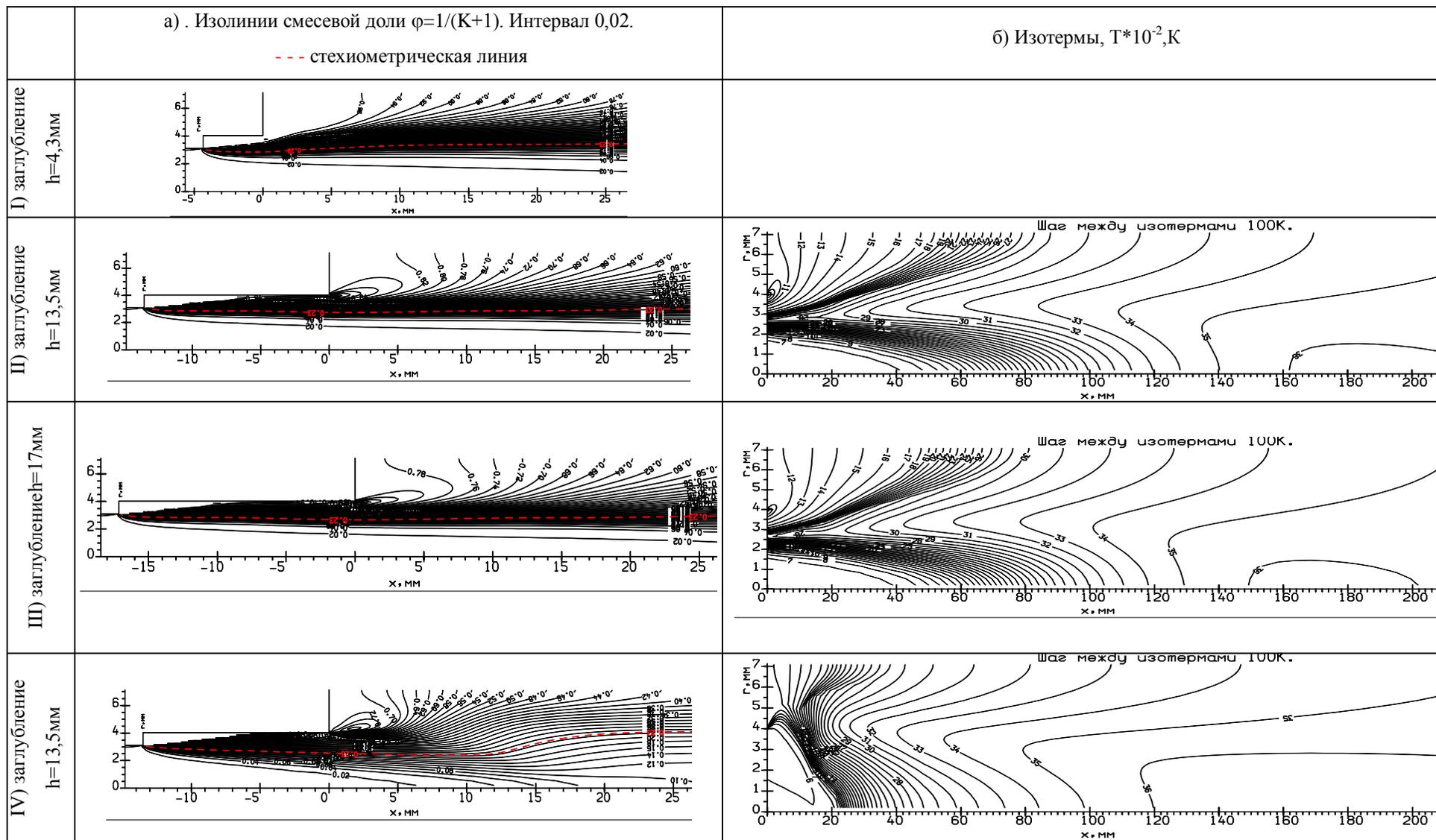


Рис. 3. Изолинии смесевой доли $\varphi=1/(K+1)$ и изотермы для различных величин заглубления канала генераторного газа

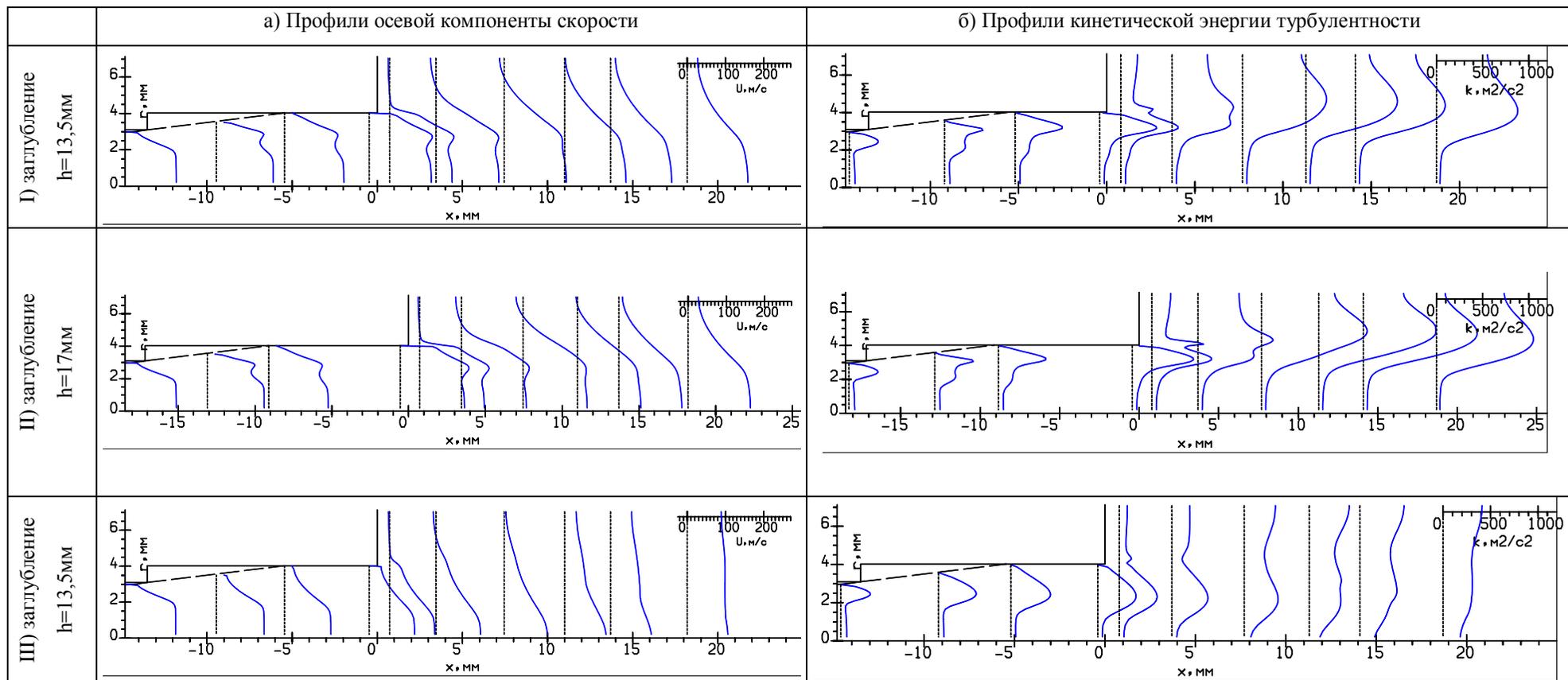


Рис. 4. Профили осевой компоненты скорости и кинетической энергии турбулентности для различных величин заглупления канала генераторного газа

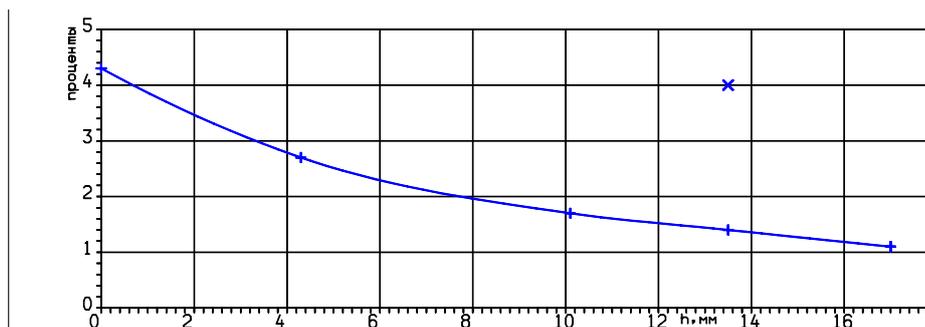


Рис. 5. Потери характеристической скорости C^* в элементе ядра потока в зависимости от величины заглубления канала генераторного газа для камеры длиной 200мм.

Выводы

Методом численного моделирования, разработанным в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», исследованы особенности рабочего процесса в модельных камерах сгорания ЖРД с соосными двухкомпонетными струйно-центробежными форсунками, работающих на топливе кислород + углеводороды (керосин).

Показано, что при заглублении канала генераторного газа стабилизация пламени может происходить как на обратных токах у огневого днища камеры, так и в канале форсунки на пелене распыляемого керосина за кромкой перегородки, разделяющей газовую и жидкостную ступени форсунки. Параметры рабочего процесса для этих случаев существенно различаются. При увеличении величины заглубления сопла генераторного газа процессы смешения и выгорания топлива интенсифицируются, растет соотношение компонентов и температура на периферии элемента ядра потока, повышается полнота сгорания.

Библиографический список

1. Теория ракетных двигателей: Учебник для студентов высших технических учебных заведений / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; Под ред. В.П. Глушко. – М.: Машиностроение, 1989, 464 с.
2. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. Учебник для вузов. Под ред. В.М. Кудрявцева. – М.: «Высшая школа», 1975, 656 с.
3. 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>.

4. 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.
5. Pantankar S. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980.
6. Gosman A.D., Ioannides E. Aspects of Computer Simulations of Liquid-Fuelled Combustors// AIAA Paper 81-0323, 1981.
7. Kalmykov G.P., Mosolov S.V., Sidlerov D.A., Yanchilin L.A. Numerical simulation and research of the peculiarities of the working process in LRE combustion chambers propelled by oxygen and hydrocarbons // 3rd EUCASS conference, Versailles, 6-9 July, 2009.
8. Дитякин Ю.Ф, Клячко Л.А., Новиков Б.В., Ягодкин Б.И. Распыливание жидкостей. - М.: Машиностроение, 1977.

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: pomomar_aa@mail.ru.

Смирнов Юрий Леонидович, ученый секретарь ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша", к.воен.н., тел.: +7 903-183-57-43, e-mail: yur772008@yandex.ru.