

УДК 621.454.2, 533, 519.63

Численное моделирование режимов испарения и горения капельных струй топлива в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей

Сидлеров Д.А,*Пономарев А.А.**

Исследовательский центр имени М.В. Келдыша, ГНЦ «Центр Келдыша»,

Онежская ул., 8, Москва, 125438, Россия

**e-mail: sidlerov@rambler.ru*

***e-mail: ponomar_aa@mail.ru*

Аннотация

Рассмотрена физико-математическая модель, позволяющая рассчитать особенности индивидуальных и групповых режимов испарения и горения плотных турбулентных капельных струй жидких топлив. Приведены результаты исследований особенностей рабочего процесса в камерах сгорания при варьировании режимов испарения и горения капель топлива.

Ключевые слова: испарение и горение капель топлива, камера сгорания, численное моделирование.

Введение

Разработка методов численного моделирования рабочего процесса в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) является актуальной проблемой, направленной на решение задач прогнозирования параметров процесса выгорания топлива в камерах сгорания и газогенераторах ЖРД, а также обеспечения совершенствования эксплуатируемых и разработки перспективных двигательных установок.

Развитие рабочего процесса в значительной мере определяется процессами турбулентного взаимодействия плотных капельных струй распыленного горючего и окислителя.

Испарение и горение капель, находящихся внутри струи распыленного жидкого топлива имеет ряд особенностей, связанных с эффектами коллективного взаимодействия соседних капель. Например, испарение капель в струе распыленного горючего может приводить к возникновению областей с высокой концентрацией паров горючего и, соответственно, низкой концентрацией окислителя в газовой фазе. Аналогичные явления возможны и в плотных капельных струях окислителя, где может наблюдаться повышенная концентрация паров окислителя.

Проведенные исследования показывают, что использование специальных физико-математических моделей, учитывающих эффекты взаимовлияния капель, позволяет воспроизвести при численном моделировании горения плотных топливных капельных струй режимы, когда капли не имеют индивидуальных фронтов горения, в отличие от классических моделей, основанных на теории горения уединенной капли. Во внутренних областях плотных пучков идет испарение капель, и образовавшиеся пары растекаются к внешней границе пучка, где смешиваются и вступают в реакцию с парами другого компонента топлива, и, таким образом, формируется фронт горения, охватывающий весь пучок снаружи. Кроме того, наличие большого количества капель холодного топлива приводит к снижению температуры газовой фазы в межкапельном пространстве. Комбинация эффектов снижения концентрации окислителя и охлаждения потока может привести

к тому, что процессы воспламенения и горения топлива во внутренних областях плотных капельных струй горючего будут подавляться. При более подробном рассмотрении данного вопроса можно выделить три режима горения/испарения капель в пучках:

режим индивидуального горения капель, характерный для разреженных пучков, когда каждая капля окружена индивидуальным фронтом горения;

режим, когда во внутренней части пучка капли не окружены индивидуальными фронтами горения (т.е. испаряются в окружении газовой фазы с избыточной концентрацией собственного пара), а во внешней части пучка реализуется режим индивидуального горения капель;

режим, когда капли испаряются внутри пучка, а фронт горения охватывает пучок снаружи.

Метод численного моделирования

В [1] изложены физико-математическая модель и численный метод расчетного моделирования двухфазных осесимметричных и трехмерных турбулентных течений с горением в камерах сгорания и газогенераторах. Математическая модель включает уравнения типа Навье-Стокса и k - ε модель турбулентности. Скорость горения определяется по модели размыва турбулентных вихрей и по обобщенному уравнению химической кинетики аррениусова 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 [2], а обыкновенные дифференциальные уравнения для дискретной (капельной) фазы интегрируются методом Рунге-Кутты [3].

Данный метод широко используется для численного моделирования рабочего процесса в модельных и натуральных камерах сгорания, имеющих смесительные элементы разнообразных типов и работающих на различных компонентах топлива [4, 5].

В настоящей работе рассматривается расчетная модель, позволяющая определить индивидуальные и групповые режимы испарения/горения плотных турбулентных капельных струй жидких топлив. Основная идея модели заключается в следующем.

Обозначим через K соотношение компонентов топлива в газовой фазе в данной точке потока. По определению $K = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_r}$, где \dot{m}_o, \dot{m}_r - массовые расходы соответственно окислителя и горючего. Характеристикой состава φ называют величину, определяющуюся по формуле $\varphi = \frac{1}{K + 1}$.

Решив уравнения диффузии для испаряющейся капли в сферически симметричной постановке с граничным условием $\varphi = \varphi_\delta$ на расстоянии δ от поверхности капли, можно получить связь между радиальной координатой r , отсчитываемой от центра капли, и характеристикой состава $\varphi(r)$:

$$r = \frac{g_0 r_{\text{ж}}^2}{\Gamma \left[\frac{r_{\text{ж}}}{\delta} \ln \left(\frac{1 - \varphi_{\delta}}{1 - \varphi_0} \right) + \ln \left(\frac{1 - \varphi_{\delta}}{1 - \varphi(r)} \right) \right]} \quad (1)$$

Здесь g_0 - удельный поток вещества капли у ее поверхности; $r_{\text{ж}}$ - радиус капли; $\Gamma = D_{\text{п}} \rho$; $D_{\text{п}}$ - среднее по пограничному слою капли значение коэффициента диффузии; ρ - плотность газа; φ_0 - характеристика состава у поверхности капли.

Зная, что удельный поток вещества g_0 реализуется при $r = r_{\text{ж}}$, и считая $\varphi_{\delta} = \varphi_{\infty}$ (- концентрации паров горючего в окружающем газе, получаемой из решения эйлеровых уравнений диффузии для газовой фазы), определим из (1) эффективную толщину слоя δ :

$$\delta = \frac{\Gamma r_{\text{ж}} \ln \left(\frac{1 - \varphi_{\delta}}{1 - \varphi_0} \right)}{g_0 r_{\text{ж}} - \Gamma \ln \left(\frac{1 - \varphi_{\delta}}{1 - \varphi_0} \right)}.$$

Величина g_0 также может быть получена из решения уравнения диффузии для покоящейся капли в сферически симметричной постановке. Однако в реальных условиях такие допущения неприменимы, поэтому величину g_0 следует определять из следующего эмпирического соотношения:

$$g_0 = \frac{D_{\text{п}} \rho}{r_{\text{ж}}} \ln \left(1 + \frac{\varphi_0 - \varphi_{\infty}}{1 - \varphi_0} \right) \cdot \frac{\text{Sh}}{2}.$$

Здесь Sh - число Шервуда, которое, в свою очередь, рассчитывается по формуле

$\text{Sh} = 2 + 0,54 \text{Re}^{\frac{1}{2}} \text{Sc}^{\frac{1}{3}}$, где Re , Sc - соответственно числа Рейнольдса и Шмидта.

Таким образом, определяется средний эффективный радиус фронта пламени в условиях, когда капли движутся относительно газа, фронт пламени деформируется и не является сферически симметричным.

Радиус окружающего каплю фронта пламени $r_{\text{стех}}$ соответствует стехиометрическому значению $\varphi(r) = \varphi_{\text{стех}}$. Расстояние между каплями в пучке можно оценить так: $L_{\text{жж}} \approx (1/n_{\text{ж}})^{1/3}$, где $n_{\text{ж}}$ - количество капель в единице объема. Если расстояние между каплями больше диаметра фронта горения, окружающего капли, т.е. $L_{\text{жж}} > 2 \cdot r_{\text{стех}}$, то возможен режим индивидуального горения капель. В противном случае реализуется режим группового горения/испарения капель.

Численное моделирование и исследование особенностей испарения и горения плотных топливных капельных струй в камерах сгорания

Разработанный расчетный метод использован для исследования особенностей развития рабочего процесса в камерах сгорания с сооснотруйными смесительными элементами при варьировании режимных параметров. Проведена серия расчетов, результаты которых позволили исследовать особенности испарения и горения капельных струй при изменении начальной температуры топлива, параметров распыла и давления в камерах сгорания.

Рассмотрим результаты исследований для элемента ядра потока камеры сгорания, работающей на топливе кислород + керосин с давлением $P=1$ МПа при соотношении компонентов $K = 2,6$. Через центральный цилиндрический канал струйно-центробежной газожидкостной форсунки подается генераторный газ с соотношением компонентов $K_{\text{гр}} = 60$, а через периферический кольцевой канал –

керосин. Начальная температура каплей керосина $T_0 = 300$ К, а для других начальных параметров каплей керосина в расчетах задавалось гауссово распределение при среднем диаметре по Заутеру [6] $d_0 = 150$ мкм.

Детальная структура газок капельного потока видна на рис. 1, где представлены линии тока газовой фазы и выборочные траектории каплей. Красным цветом обозначены капли керосина, которые находятся в режиме индивидуального горения, т.е. каждая капля окружена собственным фронтом пламени, а зеленым цветом - капли керосина, которые не имеют индивидуальных фронтов горения и находятся в режиме испарения и группового горения.

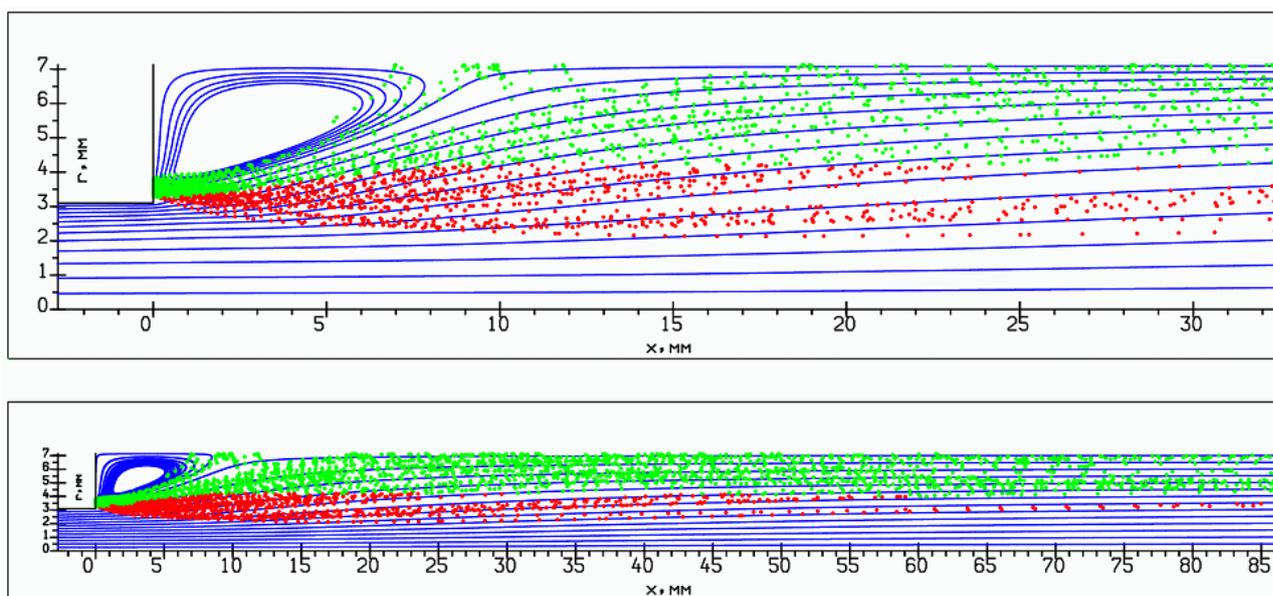


Рисунок 1 - Структура газок капельного течения. Синими линиями обозначены линии тока газовой фазы. Символами \circ обозначены выборочные траектории каплей горючего в режиме индивидуального горения, а символами \circ - в режиме испарения/группового горения.

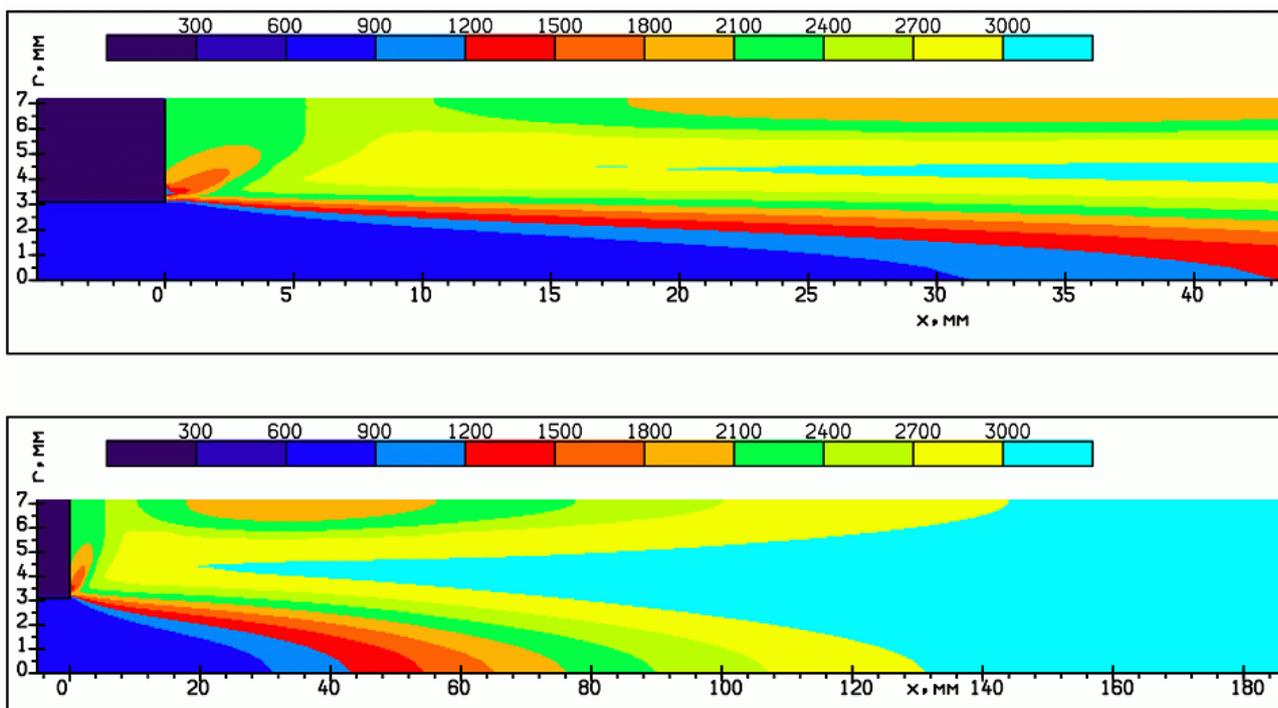


Рисунок 2 - Поле температуры, К.

Отметим основные особенности поведения пучка капель керосина. Непосредственно после попадания в камеру капли находятся в режиме испарения/группового горения. По мере движения капли, находящиеся в той части керосиновой струи, которая граничит с потоком генераторного газа, входят в зону индивидуального горения. Как видно, зона индивидуального горения составляет существенную долю (около 1/3) от общего расхода керосина. В дальнейшем по мере прогрева и испарения капель, изменения температуры (рис. 2), концентраций горючего, окислителя и продуктов сгорания (рис. 3) в потоке происходят изменения, которые приводят к тому, что часть капель в средней части пучка переходят из режима индивидуального горения в режим испарения/группового горения.

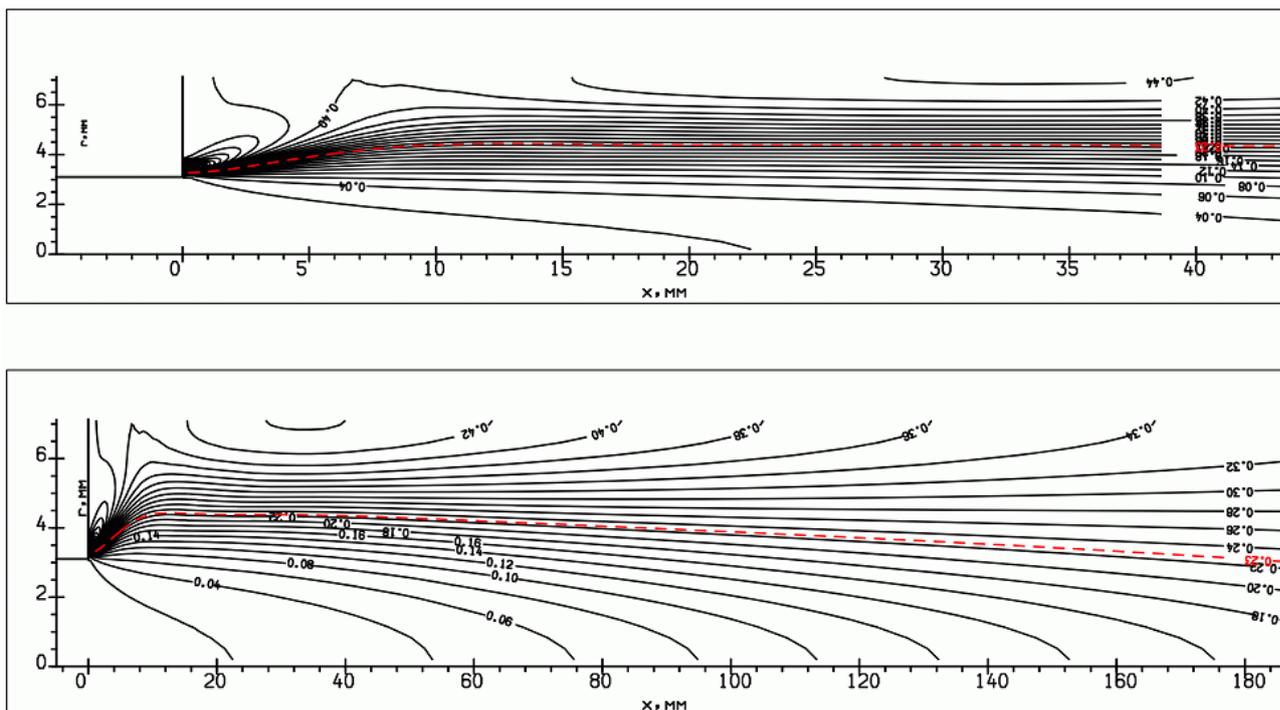


Рисунок 3 - Изолинии характеристики состава φ . Красной пунктирной линией обозначена стехиометрическая линия.

Данный вариант характеризуется неравномерными концентрационными и температурными полями в окрестности инъекции горючего и повышенной температурой в периферической зоне на начальном участке. Основная причина этих явлений – относительно малая скорость газификации горючего, которая обуславливается большим исходным диаметром и низкой начальной температурой капле, а также относительно небольшим давлением в камере сгорания.

Для адекватного моделирования рабочего процесса в камерах сгорания, работающих на жидком топливе, учет режимов индивидуального и группового горения каплевидных струй может быть очень важен. Для демонстрации этого утверждения был проведен специальный расчет. Все параметры расчетной модели в данном расчёте совпадают с вариантом, рассмотренным выше, за исключением одного – в данном варианте отключена опция, воспроизводящая режим

индивидуального горения капле. Результаты этого расчета приведены на рис. 4–6.

Проведем сравнительный анализ особенностей рабочего процесса.

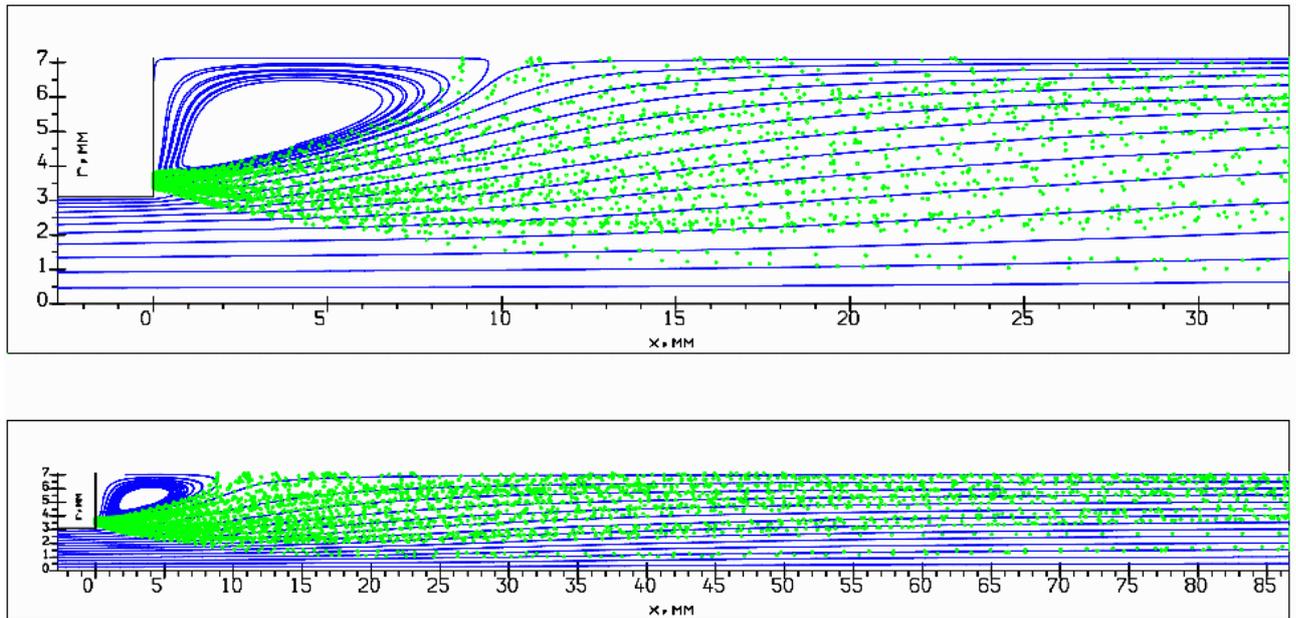


Рисунок 4 - Структура газокapлепного течения. Синими линиями обозначены линии тока газовой фазы. Символами \circ обозначены выборочные траектории капле горючего в режиме индивидуального горения, а символами \bullet – в режиме испарения/группового горения. В расчете отключена опция режима индивидуального горения капле.

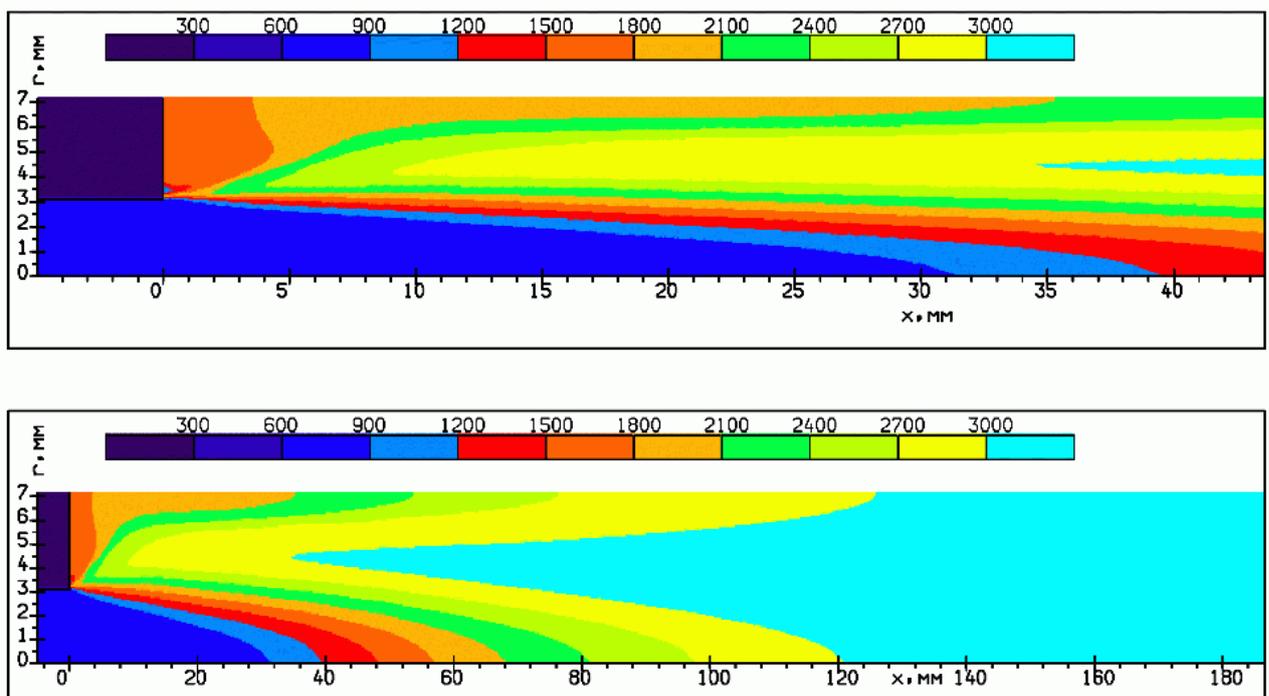


Рисунок 5 - Поле температуры, К.

В расчете отключена опция режима индивидуального горения капель.

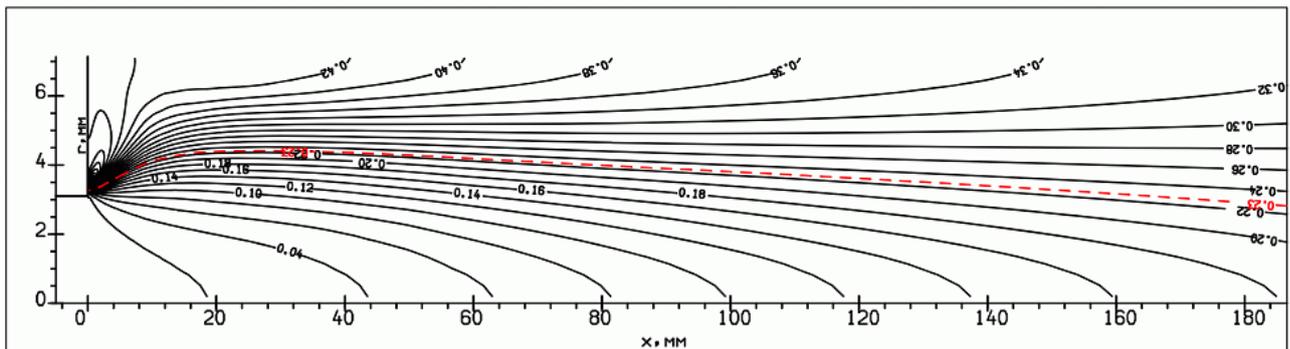
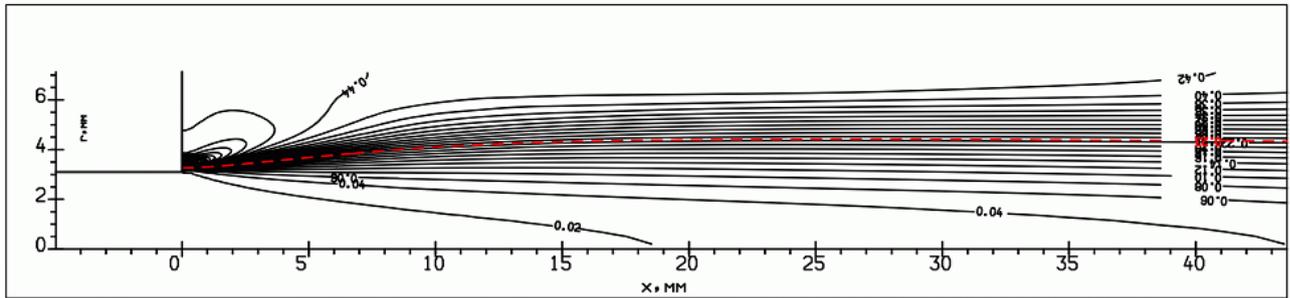


Рисунок 6 - Изолинии характеристики состава φ . Красной пунктирной линией обозначена стехиометрическая линия. В расчете отключена опция режима индивидуального горения капель.

Отключение опции индивидуального горения капель приводит к снижению темпов прогрева и, следовательно, к уменьшению скорости испарения капель горючего, находящихся в зоне высокой концентрации окислителя (рис. 4). Это, в свою очередь, вызывает уменьшение скорости выгорания компонентов топлива, а также соотношения компонентов в газовой фазе и температуры внутри пучка капель (рис. 5, 6). Соответственно, снижается концентрация продуктов сгорания. Различие в уровне температур между двумя рассматриваемыми вариантами в периферической области потока на начальном участке достигает 500 К. Указанные отличия в структуре двухфазного турбулентного потока существенно меняют тепловой режим

конструкции камеры на начальном участке, параметры высокочастотной устойчивости рабочего процесса и полноту выгорания топлива.

Выводы

Проведена доработка метода численного моделирования взаимодействия и горения плотных топливных капельных струй, которая позволяет учесть возможность реализации различных режимов индивидуального и группового горения капельных пучков.

Представлены результаты расчетов, демонстрирующие возможности метода по исследованию особенностей рабочего процесса в камерах сгорания с соосными струйно-центробежными газожидкостными смесительными элементами для различных режимов горения топливных струй.

Библиографический список

1. 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.
2. Pantankar S. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980, 197 p.
3. Gosman A.D., Ioannides E. Aspects of Computer Simulations of Liquid-Fuelled Combustors // *AIAA Paper 81-0323*, 1981.

4. 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 // Электронный журнал «Труды МАИ», 2012, №58: [http:// www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=33406](http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=33406) (дата публикации 26.09.2012).
5. 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 // Электронный журнал «Труды МАИ», 2012, №59: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=34989> (дата публикации 23.11.2012).
6. Дитякин Ю.Ф, Клячко Л.А., Новиков Б.В., Ягодкин Б.И. Распыливание жидкостей. - М.: Машиностроение, 1977. – 206 с.