

УДК 621.452.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ И СМЕШЕНИЯ ТОПЛИВА С ВОЗДУХОМ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

© 2011 В. В. Третьяков

Центральный институт авиационного моторостроения, г. Москва

В работе представлена модель испарения и смешения капельно-жидкого, парообразного и газообразного топлива в камере сгорания. С помощью этой модели решены следующие задачи. Рассчитаны поля скорости воздушного потока за завихрительными фронтными устройствами трёх видов. Определена гидродинамическая структура течений в модулях МОГОС с префильмером и без него. Выполнены расчёты течений для модуля с двухъярусным завихрителем при варьировании профилей компонент скорости на выходе из завихрителя. Проведены расчёты распределений капельно-жидкого, парообразного и газообразного топлива в модуле каждого типа.

*Камера сгорания, распыливание, испарение, смешение.*

### Введение

Работа посвящена вопросам экспериментального и численного исследования процессов смешения парообразного топлива с воздухом в форсуночных модулях камер сгорания современных ГТД. Рассматриваются два вида завихрительного фронтного устройства: двухъярусный осерадиальный завихритель и трёхъярусный модуль МОГОС (МОдуль с ГОмогенизацией горючей Смеси). Схемы обоих завихрителей приведены на рис.1.

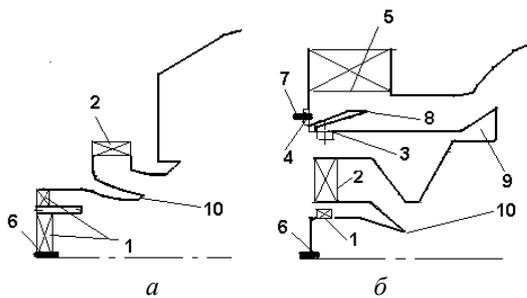


Рис. 1. Схемы двухъярусного (а) и трёхъярусного (б) завихрителей

На схемах: 1-5 – отверстия подвода воздуха, 6, 7 – топливные форсунки, 8 – префильмер, 9 – стабилизатор, 10 – разделитель. Основные отличия в приведённых схемах следующие. Двойной осевой вход первого яруса двухъярусного завихрителя заменен тангенциальным в модуле МОГОС, а радиальный завихритель второго яруса – осевым; добавлен третий

ярус с радиальным входом воздуха, в котором для улучшения распыла топлива, подаваемого из наружных пневматических форсунок, установлен префильмер. В двухъярусном завихрителе всё топливо подаётся через центробежную форсунку, а в трёхъярусном – через центробежную и 12 пневматических форсунок подачи основного топлива. Направления закруток потоков во всех завихрителях одинаковы. Центральный внутренний канал двухъярусного завихрителя может быть также использован для подачи газообразного топлива. Исследования проведены для описанного варианта двухъярусного завихрителя и двух вариантов модуля МОГОС: с префильмером и без префильмера.

Использованная для анализа эффективности смешения методика состоит из расчётов характеристик течения воздуха в рабочем объёме камеры сгорания и распределения концентраций капельно-жидкого и парообразного топлива в этом объёме. Первые основываются на численном интегрировании уравнений Рейнольдса, записанных в переменных скорость-давление для случая стационарного турбулентного закрученного течения постоянной плотности, вторые – на интегрировании уравнений, описывающих движение отдельных капель. При этом данные о расходах топлива, начальных ско-

ростях и углах вылета каплей берутся из результатов автономных испытаний центробежных и пневматических форсунок. Распределение концентраций газообразного топлива рассчитывается по уравнениям переноса пассивной примеси. В экспериментах для определения характеристик газовых потоков использовался прибор Particle Image Velocimetr (PIV). В опытах определялись поля скоростей воздушного потока, распределение концентраций каплей и распределение концентраций топливных паров в рабочем объёме.

### Методика численных расчётов

Предполагается, что течение является стационарным и осесимметричным. В этом случае система уравнений Рейнольдса, записанная в консервативной форме, имеет следующий вид:

$$\text{Div}(\mathbf{r}U\mathbf{f} - G_f \text{grad } f) = S_f. \quad (1)$$

Здесь  $U$  – вектор осреднённой скорости газовой смеси,  $f$  – зависимая переменная,  $G_f$  – коэффициент диффузионного переноса,  $r$  – плотность,  $S_f$  – источник член.

Система уравнений (1) решается с использованием двухпараметрической модели турбулентности  $k-\varepsilon$  конечно-разностным итерационным методом [1].

В качестве граничных условий во входных сечениях задаются профили трёх компонент скорости, которые считаются параметрами задачи. На твёрдых границах используется "закон стенки", записанный для полной скорости. На боковых границах ставятся условия периодичности. В выходном сечении – "мягкие" граничные условия ( $\partial f / \partial x = 0$ ). Условие для давления состоит в задании его значения в некоторой точке расчётной области, в данном случае – в выходном сечении модуля на его оси. Аналогичные условия ставятся и для характеристик турбулентности.

Принятая в данной работе методика расчёта концентрации топлива аналогична описанной в работах [2, 3]. При этом рас-

чёт движения отдельной капли жидкости в известном газодинамическом поле производится интегрированием обыкновенного дифференциального уравнения вида:

$$m \, dV/dt = R, \quad (2)$$

где  $m$  – масса капли,  $V$  – её скорость,  $R$  – сила аэродинамического сопротивления. На данном этапе моделирования пренебрегается влиянием на движение каплей турбулентных пульсаций скорости воздушного потока и изменением формы каплей в процессе их движения. Считается также, что закон сопротивления каплей такой же, как закон сопротивления твёрдых частиц сферической формы.

При моделировании распыла топлива полагается, что распределение каплей по размерам подчиняется закону Розина-Раммлера с показателем  $n=3$ , а распределение каплей в окружном (по углу  $j$ ) и продольном (по углу  $\psi$ ) направлениях – нормальному закону. Начальные скорости каплей  $V_0$  задаются модулем скорости  $V_0$  и значениями продольного и окружного углов:  $\psi_k$  и  $\varphi_k$ . В расчётах предполагается, что топливо, попавшее на стенки модуля, образует на них жидкие пленки, которые, перемещаясь под действием воздушных потоков, достигают острых кромок модуля, где и происходит их «вторичный» пневматический распыл. Начальные данные по характеристикам этого распыла приняты в соответствии с экспериментальными результатами работы [4]. В расчётах скорости воздушного потока в месте распыла приняты равными скоростям в узлах расчётной сетки, ближайших к соответствующей острой кромке со стороны движения топливной плёнки.

Для описания процессов нагрева и испарения каплей воспользуемся, аналогично [2], соотношениями:

$$\frac{dT_d}{dt} = 6I_r \left( 2 + 0,6 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \right) \frac{T_r - T_d}{r_{\text{ж}} D^2 C_{\text{ж}}} \quad (3)$$

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{Cb}{2D} \left( 1 + 0,23 \text{Re}^{1/2} \right), \quad (4)$$

$$\text{где } Cb = \frac{8I_{\Gamma}}{r_{ж} C_{p\Gamma}} \ln \left( 1 + \frac{C_{p\Gamma}}{L} (T_{\Gamma} - T_d) \right);$$

$\lambda_{\Gamma}$  - коэффициент теплопроводности газа;  $C_{ж}$  - коэффициент удельной теплоёмкости жидкости,  $C_{p\Gamma}$  - коэффициент удельной теплоёмкости газа при постоянном давлении;  $L$  - скрытая теплота парообразования;  $T_{\Gamma}$  - температура газа;  $T_d$  - температура капли.

Эти соотношения получены из уравнения теплового баланса приравниванием коэффициентов тепло- и массопереноса и пренебрежением теплом, идущим на испарение капли, по сравнению с теплом, идущим на её нагрев во время прогрева.

В результате решения системы уравнений (1)-(4) с соответствующими граничными условиями находятся траектории отдельных капель и изменение параметров этих капель вдоль их траекторий. По полученным данным в рабочем объёме камеры находятся распределения концентраций капельно-жидкой топливной фазы  $C_k$  и скорости парообразования  $\mathcal{M} C_v / \mathcal{M}_t = c_t$ . Расчёт распределений парообразного топлива в рабочем объёме находится по уравнению переноса пассивной примеси (1) с источниковым членом  $S_C = c_t$ .

Проведённое сравнение результатов численных расчётов с экспериментальными данными показало, что рассчитанные профили компонент скорости в целом соответствуют экспериментальным. Кроме того, и для двухъярусного завихрителя, и для модуля МОГОС установлено хорошее совпадение результатов численных расчётов и экспериментов по профилям компонент скорости и размерам центральной зоны обратных токов. Результаты этих сопоставлений опубликованы в работе [5].

О процессах смешения истекающих из завихрителей потоков можно также судить по распределениям концентраций пассивной примеси при подаче её в один из каналов. В данном случае в качестве такой примеси использовался масляный аэрозоль, подаваемый в центральный канал. На рис.2 представлено сопоставление

результатов расчётов и опытов по профилям концентрации на выходе из завихрителя.

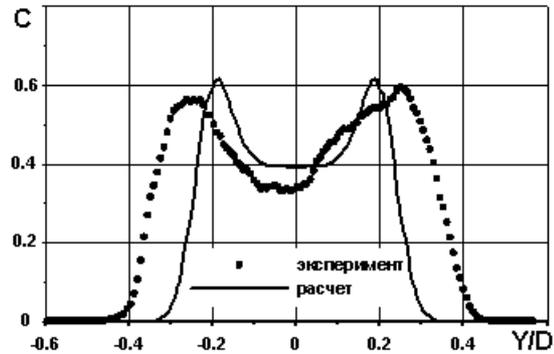


Рис. 2. Профили концентраций пассивной примеси на выходе из завихрителя

Из рис.2 видно, что в данном случае имеет место согласование в расчётных и экспериментальных распределениях. Таким образом, результаты расчётов демонстрируют приемлемое с практической точки зрения соответствие результатов расчётов и экспериментов по структуре течения вблизи выхода из завихрителя, конфигурации зоны обратных токов и распределениям концентраций. Некоторое несовпадение результатов расчётов и экспериментов, по-видимому, связано с отличиями от реальных входных профилей скорости и соответствующими различиями в интенсивностях процессов смешения истекающих из завихрителей потоков. Кроме того, как показали эксперименты, течение за данным завихрителем устройством в исследованных режимах является существенно нестационарным.

### Расчёты полей скорости и концентраций капельно-жидкого топлива за завихрителями

Эффективность смешения капельно-жидкого топлива с воздушным потоком во многом определяется гидродинамикой течения. На рис.3 и 4 в качестве примера приведены результаты расчёта полей скорости в продольных сечениях модуля с двухъярусным завихрителем и двух модификаций модуля МОГОС, установленных в жаровой трубе камеры сгорания.

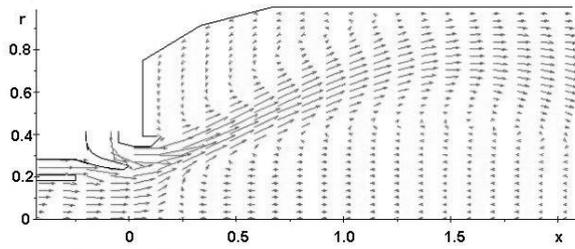
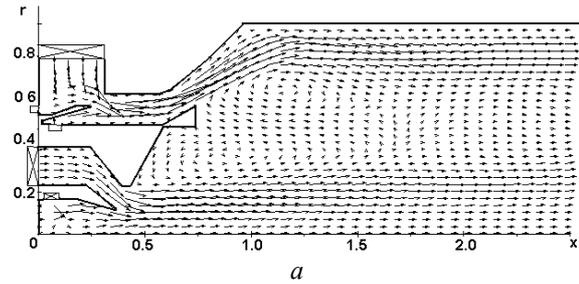


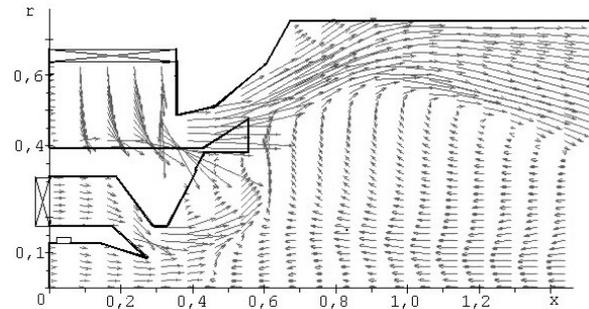
Рис. 3. Поле скорости за двухъярусным завихрителем. Вариант 2

На рисунках хорошо видны обширные зоны обратных токов (ЗОТ) в приосевой области течения и в следе за стабилизатором. Распределения концентраций капельно-жидкого топлива для двухъярусного завихрителя и модуля МОГОС без префильмера представлены на рис.5.

Сравнение результатов расчётов распределений капельно-жидкого топлива за двух- и трёхъярусными завихрителями показывает, что во втором случае топливный факел является более широким, однако имеет менее равномерную структуру в поперечном сечении модуля.



а



б

Рис. 4. Поле скорости в модуле МОГОС: а - с префильмером, б - без префильмера

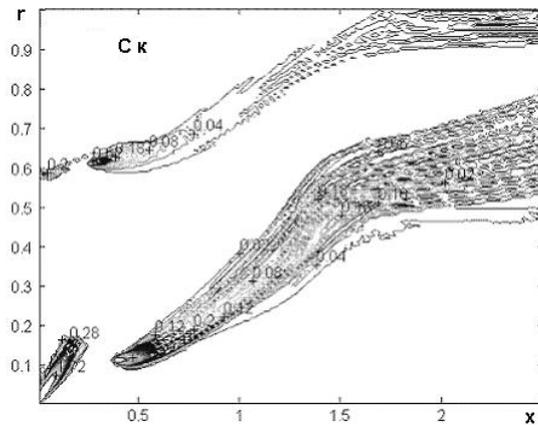
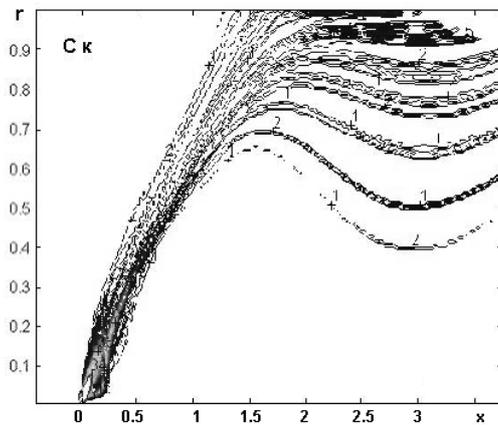


Рис. 5. Распределения концентраций капельно-жидкого топлива за двух- и трёхъярусными завихрителями

Кроме того, в модуле МОГОС распределение топлива оказалось сильно зависящим от его конструктивных и режимных параметров. В двухъярусном завихрителе распыленное топливо более равномерно заполняет поперечное сечение рабочего объёма и концентрируется вблизи фронтальной плиты. В области наружной стенки модуля имеет место сильное расширение факела, свидетельствующее об интенсификации процессов смесеобразо-

вания. Отмеченные различия определяются по крайней мере тремя причинами. Первая – в камере с двухъярусным завихрителем происходит непосредственный распыл топлива форсунками, в то время как в модуле МОГОС распределения топлива определяются его вторичным распылом с острых кромок разделителя потоков. Вторая – закрутки потоков в модуле МОГОС более значительны, что приводит к возникновению в приосевой области

развитой зоны обратных токов, которая в значительной мере формирует течение воздуха в модуле, а вместе с ним и характеристики топливного факела. Третья причина состоит в том, что формирование полей концентраций в модуле МОГОС осуществляется подачей топлива через два канала: приосевой и наружный. В этом случае топливо выходит из завихрительного устройства в виде системы отдельных струй. Поэтому его распределение в рабочем объёме существенно зависит от гидродинамики течения, которая и определяет процессы смесеобразования в модуле. Отмеченные особенности распределения концентраций подтверждены экспериментально. Так оказалось, что величины концентраций капель  $C_k$  и положения их максимумов по сечениям в расчётах и экспериментах для двухъярусного завихрителя вблизи места впрыска топлива весьма близки:  $C_{k, ЭКСП}=0.8-1.5 \text{ г/м}^3$ ,  $C_{k, РАСЧ}=1.2 \text{ г/м}^3$  для  $X=5 \text{ мм}$  и  $C_{k, ЭКСП}=0.75-0.85 \text{ г/м}^3$ ,  $C_{k, РАСЧ}=0.75 \text{ г/м}^3$  для  $X=10 \text{ мм}$ .

Аналогичные соответствия получены и для модуля МОГОС.

### Распределение концентраций парообразного топлива

Рассмотрим теперь результаты расчётов полей концентраций парообразного топлива и влияние на эти распределения закруток потоков в завихрителях модуля МОГОС без префильмера. На рис.6 приведены графики изолиний безразмерных концентраций, осреднённых по углу  $\varphi$ , для четырех вариантов течения, соответствующих режиму  $T_r=750 \text{ К}$ ,  $p_r=12 \text{ атм}$  и отличающихся структурой зон обратных токов, которая связана с различиями в закрутках потоков в центральном и внешнем радиальном завихрителях ( $u_{\theta\varphi 1}$  и  $u_{\theta\varphi 3}$ ). Во всех вариантах расчётов закрутка потока в осевом завихрителе,  $u_{\theta\varphi 1}$ , была одинаковой и равной 0,8. Здесь закрутки потоков определены как отношение вращательной составляющей скорости на выходе из завихрителя к среднерасходной скорости течения. Вариант 1:  $u_{\theta\varphi 1}=0,2$ ,  $u_{\theta\varphi 3}=3,8$ ; вариант 2:  $u_{\theta\varphi 1}=0,4$ ,  $u_{\theta\varphi 3}=3,8$ ; вариант 3:  $u_{\theta\varphi 1}=0,8$ ,  $u_{\theta\varphi 3}=3,8$ ; вариант 4:  $u_{\theta\varphi 1}=0,8$ ,  $u_{\theta\varphi 3}=1,9$ .

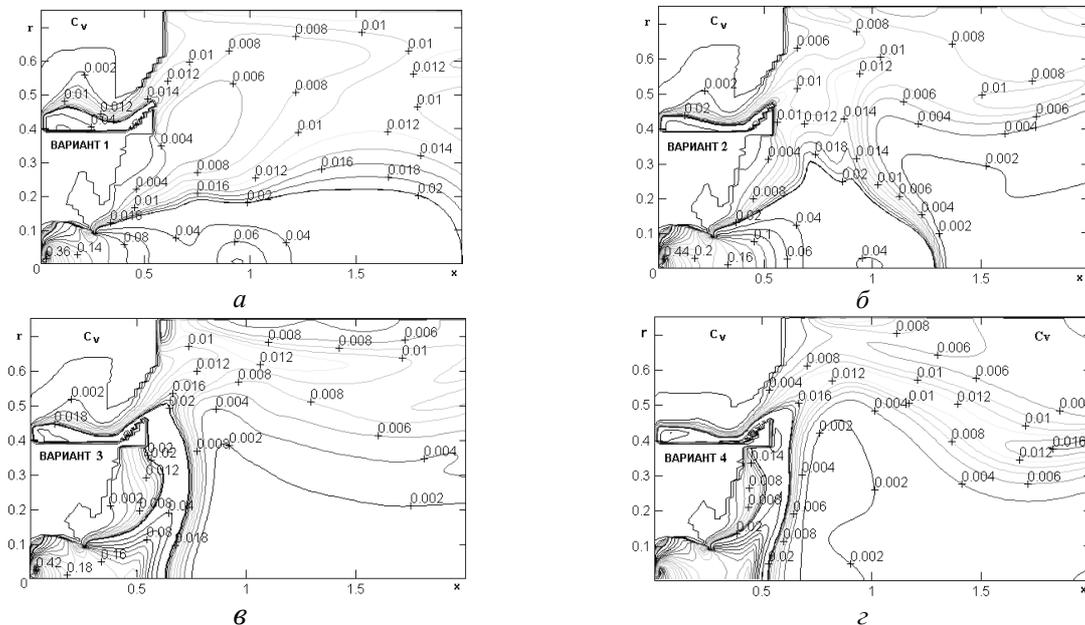


Рис.6. Профили безразмерных концентраций пара в продольном сечении модуля: режим  $T_r = 750 \text{ К}$ ,  $p_r = 12 \text{ атм}$ ; а - вариант 1, б - вариант 2, в - вариант 3, г - вариант 4

Из рисунков видно, что при закрутке центрального потока менее 0,4 ( $u_{0\varphi I}=0,19-0,38$ ) происходит обогащение парообразным топливом приосевой зоны. Это объясняется интенсивным осевым движением газового потока, связанным с отсутствием приосевой зоны обратного тока в варианте  $u_{0\varphi I}=0,19$  и расположением этой зоны на большом удалении от выходного сечения завихрителя в варианте  $u_{0\varphi I}=0,38$ . При за-

крутке в центральном завихрителе свыше 0,4 происходит интенсивный отток парообразного топлива из приосевой области на периферию.

В ещё большей степени рассмотренный эффект проявляется при уменьшении температуры газового потока. Соответствующие графики для режима  $T_I=500$  К,  $p_I=5$  атм первого и третьего вариантов течения приведены на рис.7.

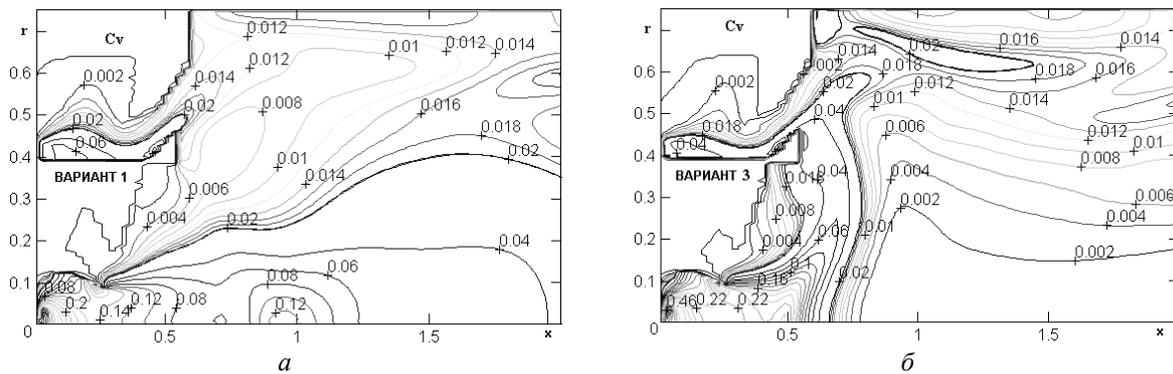


Рис.7. Профили безразмерных концентраций пара в продольном сечении модуля: режим  $T_I = 500$  К,  $p_I = 5$  атм; а - вариант 1, б - вариант 3

Сравнение полей концентраций пара, изображённых на этих рисунках, с полями рис.6 показывает, что в этом режиме равномерность распределения парообразного топлива по объёму модуля улучшилась. Таким образом, снижение температуры газа и закрутки потока в центральном завихрителе приводит в некоторых режимах к улучшению распределения парообразного топлива по объёму модуля.

### Смещение газообразного топлива с воздухом

В данном разделе рассматривается смещение газообразного топлива, подаваемого во внутренний канал двухъярусного завихрителя, с воздухом. Исследуется влияние формы профилей осевой и вращательной компонент скорости газа, вытекающего из центрального канала завихрителя, на распределение концентраций топлива в рабочем объёме камеры.

Расчёты выполнены для различных сочетаний профилей  $u_x^0$  и  $u_\varphi^0$ : - равномерный и линейный ("по закону твёрдого тела") профили. При этом вид полей скорости в продольном сечении камеры оказался похожим на приведённый на рис.3. Во всех вариантах расчётов, кроме первого, профили задавались по закону твёрдого тела, а в варианте 1 - близкому к равномерному. Профили осевой компоненты в вариантах 1 и 3 соответствовали равномерному, а в вариантах 2 и 4 - по закону твёрдого тела. При этом поля скорости всех вариантов оказались весьма похожими на поле рис.3 (вариант 4), а основные отличия связаны с расположением приосевой зоны обратных токов. Дальше всего от входа эта зона располагалась в варианте 2 (начало ЗОТ соответствовало координате  $x=0,5$ ).

Соответствующие этим полям распределения концентраций газообразного топлива приведены на рис.8.

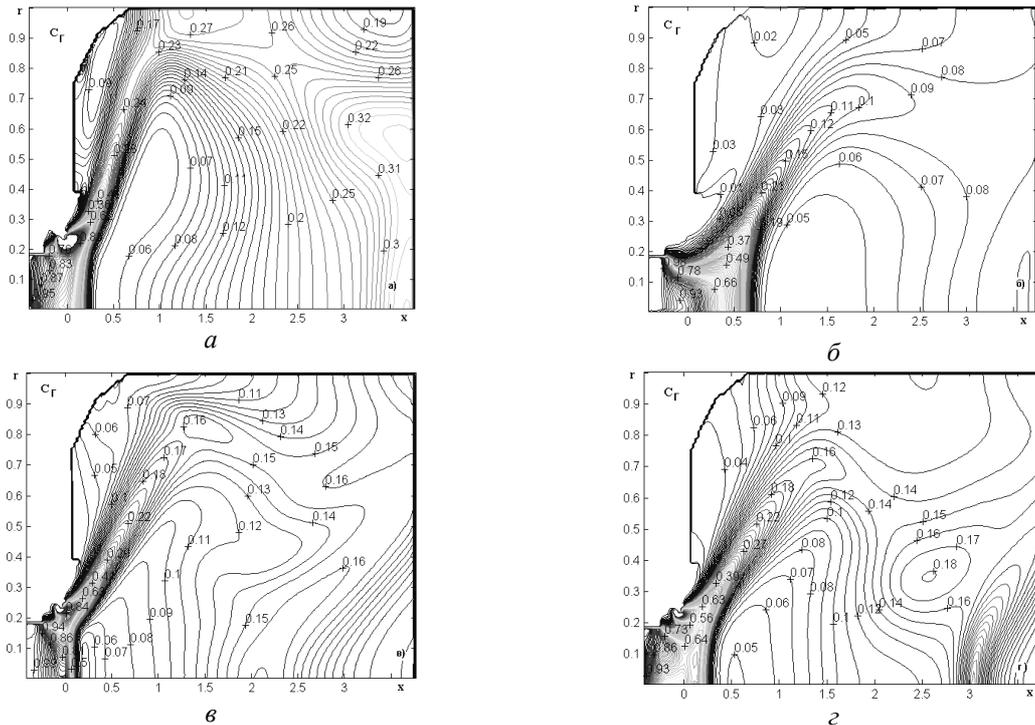


Рис.8. Поле концентраций газообразного топлива за двухъярусным завихрителем:  
 а - вариант 1; б - вариант 2; в - вариант 3; г - вариант 4

Из приведённых результатов видно, что, несмотря на близкую форму полей скорости, поля концентраций имеют заметные отличия. Так, наиболее равномерное распределение концентраций топлива имеет место в вариантах 1 и 3 (равномерный профиль осевой компоненты скорости). В этих же вариантах заметное количество топлива оказывается вблизи стенки модуля.

### Обсуждение результатов исследования

В данной работе представлена модель испарения и смешения капельно-жидкого и газообразного топлива в камере сгорания. С помощью этой модели решены следующие задачи. Рассчитаны поля скорости воздушного потока за завихрительными фронтными устройствами трех видов. Определена гидродинамическая структура течений в модулях МОГОС с префильмером и без него. Выполнены расчёты течений для модуля с двухъярусным завихрителем при варьировании профилей компонент скорости на выходе из завихрителя. Проведены расчёты распределений капельно-жидкого, парооб-

разного и газообразного топлива в модуле каждого типа.

Представленные в работе расчёты выполнены при геометрических параметрах завихрителей, которые обеспечивают минимальное попадание топлива на вход завихрительного устройства и которые установлены в работе [2]. В данном случае решались задачи о нахождении распределений топлива в рабочем объёме модулей заданной геометрии, сравнении этих распределений для различных модулей при использовании капельно-жидкого, парообразного и газообразного топлива, а также выявлении основных параметров, влияющих на эти распределения.

В результате оказалось, что в каждом из рассмотренных случаев для распределений топлива в модуле определяющей является структура зон обратных токов.

Сравнение результатов расчётов распределений капельно-жидкого топлива за двух- и трёхъярусными завихрителями показывает, что во втором случае топливный факел является более широким, однако имеет менее равномерную структуру в поперечном сечении модуля. За двухъя-

русным завихрителем распыленное топливо более равномерно заполняет поперечное сечение рабочего объема и концентрируется вблизи фронтальной плиты. Расчётами выявлена и роль префильмера в конструкции модуля МОГОС. Эта роль сводится к уменьшению доли топлива, попадающего на неохлаждаемые стенки внешнего завихрителя, и улучшению характеристик факела распыла. Кроме того, подача распыливающих и охлаждающих струй над и под префильмером снижает общую закрутку воздушного потока в завихрителе.

Задача о распределении парообразного топлива в рабочем объеме модуля решена в предположении, что обратное влияние капель на газовый поток отсутствует. Оказалось, что в модуле МОГОС при закрутках течения  $u_{\theta\phi_1}=0,78$  и  $u_{\theta\phi_3}=1,88$  в центральном и внешнем завихрителях и для всех режимов (от  $T_1=500$  К,  $p_1=5$  атм до  $T_1=850$  К,  $p_1=30$  атм) распределения концентраций топливного пара качественно весьма близки. При этом происходит отток топливных паров от оси модуля к периферии, что приводит к обеднению топливо-воздушной смеси в приосевой области. Расчёты показали, что снижение закрутки потока в центральном завихрителе приводит в некоторых режимах к обогащению топливо-воздушной смеси в приосевой области течения и улучшению равномерности распределения парообразного топлива по объёму модуля. Тем самым выявлена роль параметров закрутки потоков в центральном и наружном завихрителях при фиксированных расходах воздуха через все завихрители и закрутке потока в осевом завихрителе.

Эффективность смешения газообразного топлива с воздухом в данной работе оценена на примере двух видов фронтальных устройств: с двух- и трёхъярусными завихрителями. В расчётах для двухъярусного модуля варьируемыми параметрами были расходы газа через осевую и центральную завихрители, величины закруток потоков в них, а также фор-

мы профилей осевой и вращательной компонент скорости за центральной завихрителем. Для трёхъярусного модуля варьировались параметры наружного завихрителя и способ подачи топлива в него. Распределения топлива за двухъярусным завихрителем показывают, что наилучшее распределение топлива в рабочем объёме камеры реализуется при равномерном профиле продольной составляющей скорости и профилировании лопаток внутреннего канала по закону твёрдого тела. В этом случае топливный факел достигает пристенной области камеры в месте расположения свечи зажигания. Для модуля МОГОС напротив: топливный факел из центральной форсунки не достигает стенок камеры, что связано со сносящим воздействием воздушной струи, выходящей из радиального завихрителя. Поэтому запуск камеры при подаче топлива только через центральную завихритель весьма затруднен. В этом отношении с целью совершенствования наружного канала завихрителя МОГОС проведены специальные расчёты распределения газообразного топлива при его подаче либо через форсуночные отверстия на торцевой поверхности завихрителя, либо через его лопатки. В обоих случаях степень перемешанности потока примерно одинакова, причём соответствие имеется по профилям концентраций и их характерным значениям в выходном сечении завихрителя.

### Заключение

В целом расчёты показали, что для двухъярусного завихрителя распределение топлива в рабочем объёме камеры сгорания соответствует теоретическим представлениям о её запуске и устойчивой работе. Так оказалось, что в следе за форсункой в приосевой области находится гомогенизированная топливо-воздушная смесь, причём топливный факел достигает пристенной области камеры в месте нахождения свечи зажигания. Для трёхъярусного модуля МОГОС различных модификаций получено, что наружный завихритель независимо от способа подачи топлива обеспечивает достаточную гомо-

генизацию топливо-воздушной смеси на выходе из модуля. В то же время вытекающий из внутреннего канала поток не достигает места расположения свечи зажигания, и запуск камеры может быть осуществлён лишь при подаче топлива в наружный канал.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований. Проект № 11-01-00352.

#### **Библиографический список**

1. Krashennnikov, S.Yu. Computational-Experimental Investigation of low in the Sprayer Module of a Combustion Chamber of TAPS Circuit Design [Текст] / S.Yu. Krashennnikov, A.K. Mironov, V.V. Tretiyakov // Begell house inc. publishers, Heat Transfer Research, 2006, v. 37. Pp. 501-514.

2. Третьяков, В.В. Расчёт распределения капельно-жидкого и парообразного топлива в трёхъярусном модуле камеры сгорания [Текст] / В.В. Третьяков // Вест-

ник СГАУ. – 2006. -№2(10), ч.2. -С. 136-141.

3. Boysan, F. Three-dimensional Model of Spray Combustion in Gas Turbine Combustors [Текст] / Boysan F., Ayers W.H., Swithenbank F., Pan Z. // AIAA Paper - 81 - 0324.

4. Васильев, А.Ю. Исследования двухфазных потоков методом регистрации флуоресценции капель жидкости [Текст] / А.Ю. Васильев, А.Г. Голубев, А.А. Свириденков, В.И. Ягодкин // ОМИП — 2007, Москва, 26 - 29 июня 2007. - С. 60-63.

5. Третьяков, В.В. Экспериментальная верификация методов расчёта течения и смешения газообразного топлива за завихрительным фронтальным модулем [Текст] / В.В. Третьяков, А.К. Миронов, В.П. Маслов // III Международная конференция "Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках". Материалы конференции, 21-23 октября 2008: Москва, МЭИ (ТУ).

## **MODELING OF FUEL VAPORIZATION AND MIXING PROCESSES IN COMBUSTION CHAMBER**

2011© V. V. Tretiyakov

Central Institute of Aviation Motors (Moscow)

The paper presents a model of vaporization and mixing of liquid, vapor and gas fuel in a combustion chamber. The following problems are solved with the help of the model. The velocity fields of air flow behind front swirlers of three kinds are calculated. The hydrodynamic flow structure in MOGOS modules with and without a prefilmer is specified. Calculations of liquid, vapor and gas fuel distribution in the module of each kind are made.

*Combustion chamber, atomization, vaporization, mixing.*

### **Информация об авторах**

**Третьяков Валентин Валентинович**, кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ФГУП ЦИАМ). E-mail: [tretjak@ciam.ru](mailto:tretjak@ciam.ru). Область научных интересов: расчетно-теоретические методы исследования гидродинамики, распыливания топлива, смесеобразования и процессов тепло- и массообмена.

**Tretiyakov Valentin Valentinovich**, Candidate of physical and mathematical science, associate professor, leading researcher, Central Institute of Aviation Motors. E-mail: [tretjak@ciam.ru](mailto:tretjak@ciam.ru). Area of research: computational and theoretical methods of research of hydrodynamics, fuel atomization, mixing and heat-mass transfer processes.