

УДК 621.45.022.2

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ СМЕШЕНИЯ КАПЕЛЬНО-ЖИДКОГО ТОПЛИВА С ВОЗДУХОМ В ЗАВИХРИТЕЛЬНЫХ ФРОНТОВЫХ УСТРОЙСТВАХ

©2009 В. В. Третьяков, А. А. Свириденков

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

Работа посвящена исследованию завихрительного фронтального устройства для малоэмиссионной камеры сгорания. Рассматриваются процессы смешения капельно-жидкого топлива с воздушным потоком. Расчеты проведены на основе интегрирования уравнений Рейнольдса для газовой фазы и уравнений Лагранжа для топливных капель. Исследование процессов смешения выполнено для двух конструктивных вариантов модуля. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными показало их удовлетворительное согласование.

*Топливо, капли, фронтное устройство*

Работа посвящена вопросам экспериментального и численного исследования процессов смешения капельно-жидкого топлива с воздухом в форсуночных модулях камер сгорания современных ГТД. Рассматриваются два вида завихрительного фронтального устройства: обычный двухъярусный осеворadiaльный завихритель и одна из модификаций трехъярусного модуля МОГОС, разработанного в ЦИАМ. Схемы обоих завихрителей приведены на рис. 1.

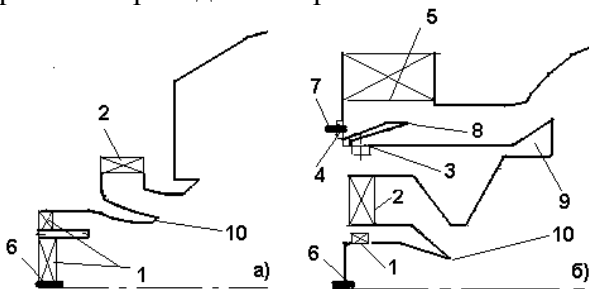


Рис. 1. Схемы а) - двухъярусного и б) - трехъярусного завихрителей

На схемах: 1 - 5 – отверстия подвода воздуха; 6, 7 – топливные форсунки; 8 – префильмер; 9 – стабилизатор; 10 – разделитель. Основные отличия в приведенных схемах следующие. Двойной осевой вход первого яруса двухъярусного завихрителя заменен тангенциальным в модуле МОГОС, а тангенциальный завихритель второго яруса – осевым; добавлен третий ярус с тангенциальным входом воздуха, в котором для улучшения распыла топлива, подаваемого из наружных пневматических форсунок, установлен префильмер. В двухъярусном завихрителе все топливо подается через центро-

бежную форсунку, а в трехъярусном – и через центробежную, и через 12 пневматических форсунок подачи основного топлива. Направления закруток потоков во всех завихрителях одинаковы. Центральный внутренний канал двухъярусного завихрителя предназначен для подачи газообразного топлива.

В работе анализ эффективности смешения делается на основе расчетно-экспериментальных методов исследования. Используемая для этого методика состоит из расчетов характеристик течения воздуха в рабочем объеме камеры сгорания и расчетов распределения концентраций капельно-жидкого топлива в этом объеме. 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 скоростях и углах вылета капель берутся из результатов автономных испытаний центробежных и пневматических форсунок. Распределение концентраций газообразного топлива рассчитывается по уравнениям переноса пассивной примеси. Экспериментальное исследование состоит в определении характеристик газовых потоков с помощью прибора Particle Image Velosimetr (PIV); для определения характеристик распыливания используются средства лазерной диагностики топливных факелов. В опытах опреде-

лялись поля скоростей воздушного потока, распределение концентраций капель, а также их распределение по размерам в рабочем объеме.

Целью работы является сравнительный анализ полей концентраций капельно-жидкого топлива в потоках, вытекающих из двух- и трех- ярусных завихрителей, и установление на основе этого анализа преимуществ и недостатков каждого из них. В данной работе также ставится задача получения надежных экспериментальных данных о полях течения и распределениях концентраций капельно-жидкого топлива в следе за завихрителем устройством на основе непосредственного сравнения результатов расчетов и опытов. В работе такое сравнение проведено для поля скорости воздуха при его истечении из модуля МОГОС, поля течения воздуха за штатным двухъярусным завихрителем при открытом центральном канале и поля концентраций капельно-жидкого топлива при его подаче в двухъярусный завихритель. Во всех случаях рассматривалось истечение в открытое пространство.

Адекватность использованных методик расчета реальности устанавливается путем сопоставления их результатов с экспериментальными данными, полученными на различных завихрителях, установленных в открытом пространстве. Решаются следующие задачи: 1) расчет поля течения воздуха при его истечении из штатного двухъярусного завихрителя в отсутствие форсунки, 2) расчет поля течения воздуха при его истечении из модуля МОГОС, 3) расчет полей концентраций капельно-жидкого топлива при его подаче в двухъярусный завихритель и 4) расчет поля концентраций газообразного топлива при его подаче во внутренний канал двухъярусного завихрителя.

Для тестирования численных расчетов полей концентраций капельно-жидкого топлива проведена серия специальных опытов при подаче жидкого топлива в центральный канал двухъярусного завихрителя.

### **2. Методики проведения опытов**

Измерение полей скорости проведено на установке, описанной в [1]. В опытах перепад давлений составлял  $\Delta P^*/P_a = 0.03$ , где  $\Delta P^* = P^* - P_a$ , и  $P_a$  – атмосферное давление.

Контроль расходов воздуха по каналам осуществлялся при помощи расходомеров с сужающимися устройствами. Точность измерения расходов составляла величину порядка 1%. Для исследования характеристик потока и измерения полей концентраций газообразного топлива применялся прибор Particle Image Velosimetr (PIV). Методика определения характеристик воздушного потока этим прибором основывалась на использовании цифровой видеосъемки течений, засеиваемых частицами нейтральной плавучести, и специальных комплексных алгоритмов обработки данных. В результате получались мгновенные пространственные распределения полей скорости потока и другие его характеристики.

В экспериментах по исследованию характеристик распыла топлива использовалась установка, оснащенная лазерными средствами диагностики топливных факелов. В опытах определялись мелкость распыливания капель и их распределение в измерительном объеме, а также расходы воздуха и топлива через завихрители и форсунку исследуемого модуля. Относительная погрешность измерений расходов топлива и воздуха, а также давления не превышала 1%.

Оптический метод измерения среднезаутеровского диаметра капель и их концентрации в факеле распыла за модулем состоит в сравнительном измерении интенсивности рассеянного света, проходящего через щели различной конфигурации (плоскую и секторную). Это – метод малоуглового рассеивания, см. [2]. В результате определяется концентрация частиц в объеме  $S_v$ , которая пропорциональна относительному объему капель в воздухе. Установка обеспечивала 5% точность измерения величины  $d_{32}$  в диапазоне  $5 < d_{32} < 100$  мкм.

### **3. Методика численных расчетов**

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

$$\operatorname{div}(\rho U \phi - \Gamma_\phi \operatorname{grad} \phi) = S_\phi. \quad (1)$$

Здесь  $U$  – вектор осредненной скорости газовой смеси,  $\phi$  – зависимая переменная,  $\Gamma_\phi$  – коэффициент диффузионного переноса,  $\rho$  – плотность,  $S_\phi$  – источниковый член.

Записанная в виде (1) система уравнений решается с использованием двухпараметрической модели турбулентности  $k-\epsilon$  конечно-разностным итерационным методом, описанным в [3].

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

Принятая в данной работе методика расчета концентрации топлива основана на расчете движения отдельных капель, см. [4].

При этом движение отдельной капли жидкости в известном газодинамическом поле описывается обыкновенным дифференциальным уравнением вида

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

где  $m$  – масса капли,  $V$  – ее скорость,  $R$  – сила аэродинамического сопротивления.

При моделировании распыла топлива полагается, что распределение капель по размерам подчиняется закону Розина-Раммлера с показателем  $n = 3$ , а распределение капель в окружном (по углу  $\phi$ ) и продольном (по углу  $\psi$ ) направлениях – нормальному закону. Начальные скорости капель  $V_\theta$  задаются модулем скорости  $V_\theta$  и значениями продольного и окружного углов:  $\psi_k$  и  $\phi_k$ . В расчетах 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 «вторичный» пневматический распыл топлива. Начальные данные по характеристикам этого распыла приняты в соответ-

ствии с экспериментальными результатами работы [5]. В расчетах скорости воздушного потока в месте распыла приняты равными скоростям в узлах расчетной сетки, ближайших к соответствующей острой кромке со стороны движения топливной пленки.

#### 4. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными

На рис.2 приведено сопоставление результатов численных расчетов с экспериментальными данными [1] по профилям продольной ( $U_x$ ) и вращательной ( $U_\phi$ ) компонент скорости в сечении выхода из завихрительного устройства. В этих расчетах  $G_1 = 6.88$  г/с,  $G_2+G_3 = 52.3$  г/с, где  $G_1$  – расход воздуха через центральный канал,  $G_2$  и  $G_3$  – расходы воздуха через осевой и радиальный завихрители, значения расходов воздуха через которые приняты одинаковыми. На рисунках сплошные линии – расчет, точки – эксперимент.

Видно, что рассчитанные профили скоростей в целом соответствуют экспериментальным.

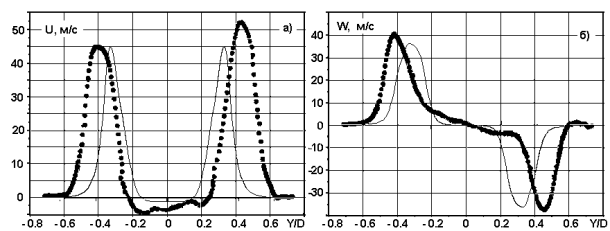


Рис. 2. Профили скорости  $U_x$  и  $U_\phi$  на выходе из завихрителя

Из рисунков видно, что рассчитанные профили и продольной, и вращательной компоненты скорости являются более узкими, а их максимальные значения находятся ближе к оси модуля, чем это имеет место в эксперименте. Кроме того, величина продольной компоненты скорости на оси в зоне обратного тока в расчете меньше, чем в эксперименте.

Аналогичные сопоставления сделаны и для модуля МОГОС. Результаты этого сопоставления опубликованы в работе [3]. В этом случае было установлено хорошее совпадение и по профилям компонент скорости, и по размерам центральной зоны обратных токов.

В расчетах значения вращательных компонентов скоростей на выходе из завихрителей задавались в соответствии с углами установки лопаток закручивающих аппаратов:  $\varphi_1 = 27^\circ$ ,  $\varphi_2 = \varphi_3 = 45^\circ$ .

О процессах смешения истекающих из завихрителей потоков можно также судить по распределениям концентраций пассивной примеси при подаче ее в один из каналов. В опытах [1] в качестве такой примеси использовался масляный аэрозоль, подаваемый в центральный канал.

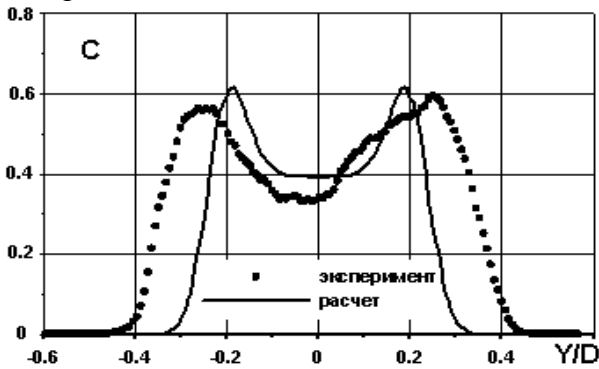


Рис. 3. Профили концентраций пассивной примеси на выходе из завихрителя

На рис.3 представлено сопоставление результатов расчетов и опытов по профилям концентрации на выходе из завихрителя. Видно, что и в этом случае имеет место приемлемое согласование в расчетных и экспериментальных распределениях.

Таким образом, результаты расчетов демонстрируют приемлемое с практической точки зрения согласование с экспериментальными данными и по структуре течения вблизи выхода из завихрителя, и по конфигурации зоны обратных токов, и по распределениям концентраций. Некоторое несоответствие результатов расчетов 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 завихрительным устройством в исследованных режимах является существенно нестационарным.

В связи с отсутствием экспериментальных данных по полям концентраций ка-

пельно-жидкого топлива, на которых можно было бы тестировать численные расчеты, была проведена серия специальных опытов для жидкого топлива при его подаче в двухъярусный завихритель, установленный в открытом пространстве. На рис. 4 приведено сопоставление расчетных и экспериментальных профилей концентраций капель в продольном сечении завихрителя.

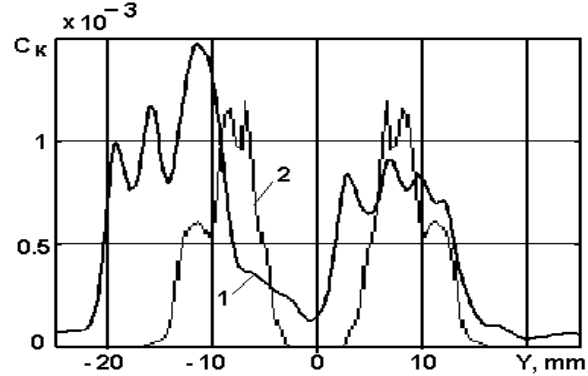


Рис. 4. Профили концентраций топлива  $C_k$  в сечении  $X = 5$  мм: 1 – эксперимент; 2 – расчет

Здесь также видно, что имеет место приемлемое согласование расчетных и экспериментальных распределений.

### 5. Характеристики топливного факела за двухъярусным завихрителем

На рис. 5 приведены экспериментальные распределения произведения концентрации топлива на местную ширину факела ( $C_y = C_k \times Y_\phi$  – условная концентрация), измеренные вдоль хорды топливного факела. Здесь истинная концентрация  $C_k$  – доля объема, занимаемого каплями топлива в факеле распыла,  $Y_\phi$  – ширина факела в поперечном направлении (вдоль хорды). Таким образом, истинное значение концентрации капель  $C_k = C_y / Y_\phi$ , где для графика рис. 5-а  $Y_\phi = 43$  мм. Рассчитанное по распределению рис. 5-а среднее значение условной концентрации  $C_{y,cp} = 4.3 \times 10^{-4}$  (см), а среднее значение истинной концентрации  $C_{k,cp} = 10^{-4}$ . Так как доля объема, занимаемого распыленными каплями, равна отношению расходов топлива и воздуха, деленному на отношение их плотностей, то средняя объемная концентрация топлива равна  $C_{k,cp} = G_T / (G_B \times \rho_T / \rho_B)$ . В опытах эта величина измерялась непосредственно и оказалась равной  $C_{k,cp} = 9.23 \times 10^{-5}$ , что очень близко к ее значению, полученному из обработки экспериментальных профилей  $C_k$ .

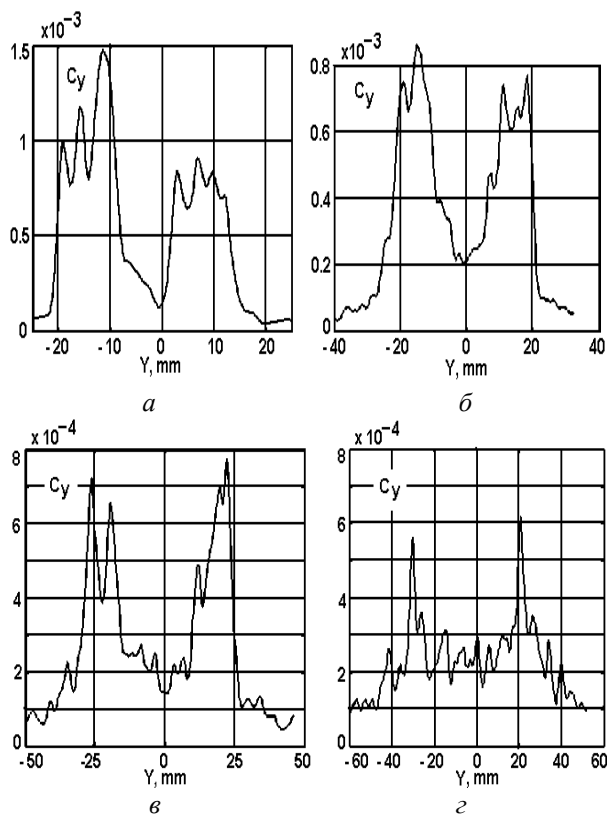


Рис. 5. Распределение концентрации топлива по диаметру факела распыливания:  $X = 5$  мм (а); 10 мм (б); 20 мм (в); 30 мм (г)

Опыты проведены при следующих параметрах:  $\Delta P_{\phi} = 3.2$  кПа,  $G_g = 52$  г/с,  $G_m = 3.2$  г/с.

На рис. 6 приведено изменение средней относительной концентрации топлива по длине факела.

Как следует из приведенных графиков рис. 5 и 6, процесс смешения топлива с воздухом практически заканчивается на расстоянии  $X = 25$  мм от места впрыска (фронтальной плиты). Видно, что неравномерность в распределении концентраций, наблюдаемая на расстоянии  $X = 5$  мм от форсунки, быстро исчезает в результате интенсивного смешения топлива с воздухом.

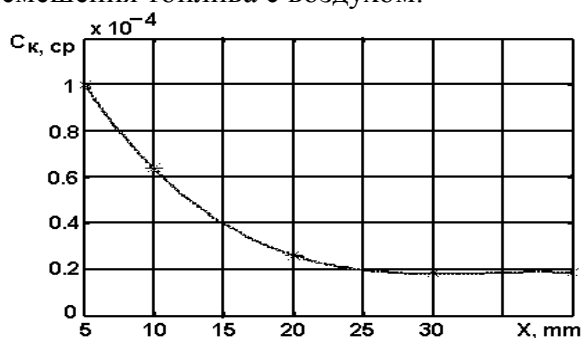


Рис. 6. Распределение средней концентрации топлива по длине факела:  $\Delta P_{\phi} = 3.2$  кПа;  $G_g = 52$  г/с;  $G_m = 3.2$  г/с

Интересно отметить, что в начальных сечениях, на расстояниях  $X < 30$  мм от места распыла, измеренные среднезаулеровские диаметры капель в струе оказываются постоянными и составляют приблизительно 20 мкм. В дальнейшем, при  $X > 30$  мм, размеры капель последовательно увеличиваются, особенно в периферийной части струи, где они составляют 30...40 мкм.

### 6. Расчеты полей скорости и концентраций за завихрителями

Эффективность смешения капельно-жидкого топлива с воздушным потоком во многом определяется гидродинамикой течения. На рис. 7 и 8 приведены результаты расчета поля скорости в продольных сечениях модулей, установленных в жаровой трубе камеры сгорания. Входные значения компонент скорости в каналах приняты в соответствии с экспериментально полученными значениями расходов. За характерный размер задачи  $H_0$  принят средний радиус внутренней стенки жаровой трубы  $H_0 = 60$  мм. К этой величине отнесены все линейные размеры задачи. Длина камеры принята равной  $L = 300$  мм. Характерное значение скорости течения  $U_0$  принято равным  $U_0 = 20$  м/с.

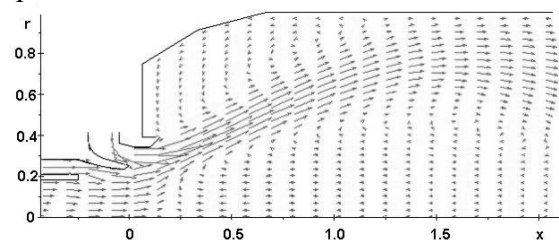


Рис. 7. Поле скорости за двухъярусным завихрителем

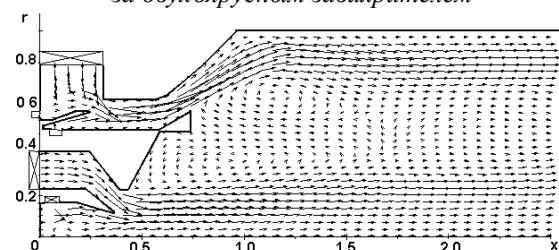


Рис. 8. Поле скорости в модуле МОГОС с префильмером

На рисунке хорошо видна обширная зона обратного тока (ЗОТ) в приосевой области течения, начинающаяся вблизи выхода из завихрителя. При истечении в затопленное пространство ЗОТ в этом режиме также начиналась непосредственно за завихрите-



как на расстояниях, больших  $X=25$  мм, максимальные значения концентраций сохраняются постоянными. На этом же расстоянии, как показывают оценки, заканчиваются процессы дробления капель, но имеют место процессы их коагуляции, о чем свидетельствует рост размеров капель на периферии топливного факела при  $X > 30$  мм. Получено также, что мелкость распыла топлива в случае двухъярусного завихрителя на начальном участке ( $5 \leq X \leq 20$  мм) составляет приблизительно 20 мкм.

Второй этап – сопоставление результатов расчетов с данными опытов. Оказалось, что характеристики течений на выходе из закручивающих устройств обоих видов с достаточной для практики точностью совпадают с экспериментальными и по профилям скорости, и по размерам зон обратных токов – ее длине  $L_{30T}$  и радиусу  $R_{30T}$ . Так, и в расчетах, и в экспериментах с трехъярусным завихрителем эти размеры оказались весьма близкими:  $L_{30T,ЭКСП} = 125$  мм,  $R_{30T,ЭКСП} = 33$  мм,  $L_{30T,РАСЧ} = 115$  мм и  $R_{30T,РАСЧ} = 30$  мм. Аналогичное соответствие имеет место и для двухъярусного завихрителя. Сопоставление результатов расчетного и экспериментального исследований для профилей концентраций капельно-жидкого топлива показало, что координаты положения максимумов концентраций топлива в расчетах и экспериментах практически совпадают. Есть также соответствие и в величинах этих максимумов, особенно в начальных сечениях факела ( $X < 30$  мм). Вместе с тем, экспериментальные профили концентраций оказались значительно шире расчетных.

В целом можно констатировать, что использованные методики расчета с приемлемой для практики точностью описывают реальные распределения.

На третьем этапе решались задачи о течениях и распределениях топлива в областях, ограниченных стенками камеры.

Оказалось, что структура газового потока в модуле отличается от структуры потока при истечении в безграничное пространство и оказывает заметное влияние на распределение топлива в камере. Вместе с тем, это влияние для двухъярусного завих-

рителя и завихрителя модуля МОГОС различно: в модуле МОГОС оно более существенно.

Сравнение результатов расчетов распределений капельно-жидкого топлива за двух- и трехъярусными завихрителями показывает, что во втором случае топливный факел является более широким, однако имеет менее равномерную структуру в поперечном сечении модуля. Кроме того, в модуле МОГОС распределение топлива оказывается сильно зависящим от его конструктивных и режимных параметров, в частности от расходов воздуха через распыливающие и охлаждающие отверстия. В двухъярусном завихрителе распыленное топливо более равномерно заполняет поперечное сечение рабочего объема и концентрируется вблизи фронтальной плиты. В области наружной стенки модуля имеет место сильное расширение факела, свидетельствующее об интенсификации процессов смесеобразования. 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 распределение топлива определяется 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 объеме существенно зависит от гидродинамики течения, которая и определяет процессы смесеобразования в модуле.

Отметим также роль префильмера в конструкции модуля МОГОС. Благодаря его установке удалось уменьшить долю топлива, попадающего на неохлаждаемые стенки

внешнего завихрителя и при этом улучшить характеристики факела распыла. Вместе с тем, подача распыливающих и охлаждающих струй над и под распыливающей пластиной снижает общую закрутку воздушного потока в завихрителе.

### **Заключение**

В результате численных расчетов смешения капельно-жидкого топлива с воздухом во фронтальных устройствах с двух- и трехъярусными завихрителями установлено, что смесительное устройство с трехъярусным завихрителем имеет более широкий факел распыла топлива по сравнению с двухъярусным. Однако за двухъярусным завихрителем капельно-жидкое топливо более равномерно заполняет поперечное сечение рабочего объема, особенно в первичной зоне модуля. Всестороннее тестирование численных расчетов проведено на основе сопоставления их результатов с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проекты № 07-08-00573 и № 08-08-00428.

### **Библиографический список**

1. Третьяков, В.В. Экспериментальная верификация методов расчета течения и смешения газообразного топлива за завихрительным фронтальным модулем/ В.В. Третьяков, А.К. Миронов, В.П. Маслов // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Матер. III междунар. конференции. конференции, 21 - 23 октября 2008 г., г. Москва, МЭИ (ТУ). На CD. Рег. № 0320802 185.
2. Ягодкин, В.И. Метод определения дисперсности и концентрации капель распыленной жидкости по интегральным характеристикам рассеянного света/ Ягодкин В.И., Голубев А.Г. // Труды ЦИАМ. – 1979.- №867
3. Krasheninnikov, S. Yu. Computational-Experimental Investigation of Flow in the Sprayer Module of a Combustion Chamber of TAPS

Circuit Design/S.Yu. Krasheninnikov, A.K. Mironov, V.V. Tretiyakov. //Heat Transfer Research, 2006, v. 37, 501-514.

4. Третьяков, В.В. Расчет распределения капельно-жидкого и парообразного топлива в трехъярусном модуле камеры сгорания/ В.В. Третьяков //Вестн. СГАУ. - 2006. - №2(10). - Ч.2. - С.136-141.

5. Васильев, А.Ю. Исследования двухфазных потоков методом регистрации флуоресценции капель жидкости / А.Ю. Васильев [и др.] // ОМИП — 2007. Москва, 26 июня — 29 июня 2007 г.

### **References**

1. Tretjakov V.V., Experimental verification of computation methods of flow field and gas fuel mixing after the sprayer module of combustion chamber / V.V. Tretjakov, A.K.Mironov, V.P.Maslov// Materials of 3rd International Conference on "Heat and mass transfer and hydrodynamics in swirling flows" 21-23 October 2008. Moscow, MEI. On CD Reg. N0320802 185.
2. Yagodkin V. I. A method of definition of dispersion and concentration of drops of the sprayed liquid under integrated characteristics of scattering light / of Jagodkin V. I, Golubev A.G.// Reports CIAM - 1979.-N867
3. Krasheninnikov, S. Yu. Computational-Experimental Investigation of Flow in the Sprayer Module of a Combustion Chamber of TAPS Circuit Design/ S.Yu. Krasheninnikov, A.K. Mironov, V.V. Tretiyakov. //Heat Transfer Research, 2006, v. 37, 501-514
4. Tretijakov V.V. Calculation of distribution of drop-forming and vaporous fuel in the three-storied module of the chamber of combustion / of V.V. Tretjakov//Vestnik SSAU. - 2006. - 2 (10). - part.2. - p.136-141.
5. Vasiliev, A.JU. Investigations of two-phased flows by means of fluid drops fluorescence measurements / A.JU.Vasilev [etc.]//OMIP - 2007. Moscow, 26- 29 June, 2007



## THE MIXING EFFICIENCY OF LIQUID DROPLET FUEL AND AIR FLOW IN THE FRONTAL SWIRL DEVICES

©2009 V. V. Tretiyakov, A. A. Sviridenkov

Central Institute of Aviation Motors

This work devoted to investigation of frontal swirl device for low-emission combustion chamber. It deals with the mixing processes of liquid droplet fuel and air flows. The numerical model includes the Reynolds equations and Lagrangian individual droplet equations. Fuel distribution calculations for any constructions of swirler were made. The results show the agreement coincident of experimental and calculation results.

*Fuel, droplet, frontal device*

### Информация об авторах

**Третьяков Валентин Валентинович**, кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова. Тел. (495) 362-90-36. E-mail: [tretjak@ciam.ru](mailto:tretjak@ciam.ru). Область научных интересов: процессы смешения в камерах сгорания ГТД.

**Свириденков Александр Алексеевич**, ведущий инженер Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова. Тел. (495) 362-90-36. E-mail: [sviriden@ciam.ru](mailto:sviriden@ciam.ru). Область научных интересов: процессы смешения в камерах сгорания ГТД.

**Sviridenkov Aleksander Alekseevich**, The leading engineer of The Central Institute Aviation Motors P.I. Baranova's name. Phone: (495) 362-90-36. E-mail: [sviriden@ciam.ru](mailto:sviriden@ciam.ru). Area of research: mixture processes in combustion chambers of GTE.

**Tretjakov Valentin Valentinovich**, Dr., Head Researcher, assistant professor, The Central Institute Aviation Motors P.I. Baranova's name, Phone: (495) 362-90-36, E-mail: [tretjak@ciam.ru](mailto:tretjak@ciam.ru). Area of research: mixture processes in combustion chambers of GTE.