

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАПЕЛЬНО-ЖИДКОГО И ПАРООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В ТРЕХЪЯРУСНОМ МОДУЛЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

© 2006 В.В. Третьяков

ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г. Москва

Представленные данные относятся конструкции модуля камеры сгорания с односторонним вращением потоков в завихрителях, фиксированной системой топливоподдачи и фиксированным распределением расходов воздуха через каждый завихритель. В результате проведенных расчетов установлено влияние основных конструктивных и режимных параметров на характеристики течения и распределения топлива в трехъярусном модуле камеры сгорания. Найдены места попадания капель на стенки модуля, которые являются областями возможных прогаров стенок. Даны рекомендации по совершенствованию конструктивных параметров модуля.

1. Введение

Данная работа посвящена вопросам математического моделирования и расчетам распределения концентраций капельно-жидкого и парообразного топлива в форсуночном модуле камеры сгорания с гомогенизацией топливовоздушной смеси. Схема модуля приведена на рис.1.

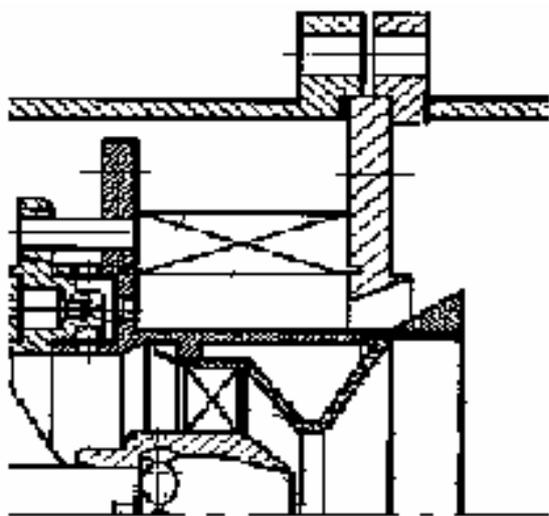


Рис.1. Схема модуля с гомогенизацией топливовоздушной смеси

В этом модуле за счет быстрого и эффективного смешения распыленного топлива с закрученным потоком воздуха создаются "бедные" топливовоздушные смеси, что обеспечивает пониженные выбросы оксидов азота. Целью настоящей работы является получение данных о влиянии основных конструктивных параметров завихрительного фронтального устройства на распределение капельно-жидкого и парообразного топлива

в нем, а именно - углов установки лопаток тангенциального завихрителя и закрутки потока в центральном завихрителе. В работе исследуется влияние этих параметров на формирование полей скорости течения и концентраций топлива как в самом модуле, так и внутри завихрительного устройства. Исследование носит расчетный характер. Оно является продолжением работы [1] и состоит в выявлении влияния на процессы смесеобразования температуры и давления газа на входе в камеру применительно к типичным режимам работы авиационного ГТД: холодных испытаний, малого газа, крейсерского и максимального. Поскольку целью работы является получение данных, необходимых для совершенствования рассматриваемого форсуночного модуля, то в проведенном исследовании особую роль играет изучение структуры течения и процессов смесеобразования внутри завихрительного устройства, т.е. в той области, где возможности экспериментального исследования весьма ограничены. При этом рассматриваются также вопросы попадания капель на лопатки завихрителей и стенки модуля.

В работе приняты следующие упрощающие предположения. При расчете движения воздуха течение считается изотермическим и осесимметричным. При расчете движения, нагрева и испарения капель пренебрегается влиянием этих процессов на характеристики газового потока. При расчете распределения паровой топливной фазы в

рабочем объеме модуля топливный пар рассматривается как пассивная примесь. Считается также, что на стенках модуля испарения топливных капель не происходит.

2. Методика расчета

Принятая в работе методика расчета объединяет в себе модель расчета турбулентных закрученных течений, модель каскадного распыливания топлива, модели движения, нагрева и испарения капель топлива и модель движения топливных паров.

Расчеты течения газовых фаз (воздуха и паров топлива) основываются на численном интегрировании полной системы уравнений Рейнольдса с использованием двухпараметрической модели турбулентности (k-ε). Подробности процедуры расчета можно найти в обзоре [2]. При этом уравнения переноса записываются в следующей консервативной форме:

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

Здесь \bar{U}_g – вектор осредненной скорости газа, φ – зависимая переменная, Γ_φ – коэффициент диффузионного переноса, S_φ – источник член.

Записанная в виде (1) система уравнений неразрывности ($\varphi \equiv 1$, $\Gamma_\varphi \equiv 0$, $S_\varphi \equiv 0$) и движения ($\varphi = U_i$, $i = 1, 2, 3$) решается конечно-разностным итерационным методом [3]. При этом предполагается, что воздушные потоки на входе имеют равномерные профили. На твердых границах ставятся условия «закона стенки». На оси – условия симметрии, в выходном сечении – условия установившегося течения.

Описанная методика предварительно была апробирована на расчете истечения воздуха из модуля в безграничное пространство. Получено приемлемое согласование результатов расчетов с данными опытов, [4].

Расчеты распределения топлива основаны на решении системы уравнений движения, нагрева и испарения отдельных капель, записанных в переменных Лагранжа [5].

Влиянием турбулентных пульсаций на движение капель и изменением формы капель в процессе их движения пренебрегалось.

При моделировании распыла топлива полагалось, что топливный факел имеет полидисперсную структуру с распределением капель по размерам по закону Розина – Раммлера с показателем $n = 3$, [6]. Распределение капель по углам принималось равномерным. Рабочей жидкостью считался керосин ТС-1 (плотность $\rho_{\text{ж}} = 840 \text{ кг/м}^3$). Исследование состояло в последовательном решении трех задач: расчета полей течения воздуха в модуле, расчета концентраций капельно-жидкого топлива и расчета распределения топливных паров с использованием уравнения (1) ($\varphi = C_v$ – концентрация топливного пара).

3. Результаты расчета течения

При расчетах полей скорости и давления считалось, что во входных сечениях модуля профили всех зависимых переменных являются равномерными и соответствующими экспериментальным данным работы [4]. За характерный размер выбран радиус выходной кромки сопла тангенциального завихрителя $No = 40 \text{ мм}$, за характерную скорость – среднерасходная скорость воздуха в этом сечении, $U_0 = 25.3 \text{ м/с}$. К этим величинам отнесены все линейные размеры и скорости. Например, $u_\varphi^0 = U_\varphi^0 / U_0$ – тангенциальная компонента скорости на выходе из завихрителя. В расчетах полей скорости варьировались величины закруток потока в центральном и тангенциальном завихрителях: φ_1 и φ_3 ($\operatorname{tg} \varphi = U_\varphi / U_r$). Остальные параметры считались фиксированными.

По результатам расчетов можно выделить следующие три характерных вида течения. Первый (вариант 1: $u_{\varphi 1}^0 = 0.19$, $u_{\varphi 3}^0 = 3.77$) характеризуется отсутствием приосевой зоны обратных токов и наличием "висячей" зоны возвратного течения в следе за стабилизатором. Второй (варианты 2 и 3: $u_{\varphi 1}^0 = 0.38$ –

0.76, $u_{\varphi 3}^0=3.77$) - появление приосевой зоны обратного тока и ее смыкание с зоной обратного тока за стабилизатором. Третий - продвижение зоны возвратного течения внутрь завихрительного устройства (это - четвертый вариант расчета: $u_{\varphi 1}^0=0.76$, $u_{\varphi 3}^0=1.88$). Вычисления проведены при фиксированных расходах воздуха через все три завихрителя: $u_{r1}^0=-0.47$, $u_{x1}^0=0.47$, $u_{r3}^0=-1.37$ и фиксированной закрутке потока в осевом завихрителе $u_{\varphi 2}^0=0.81$. Здесь x и r – продольная и радиальная координаты. Таким образом, второй и третий варианты расчета соответствовали последовательному двукратному и четырехкратному увеличению закрутки потока в центральном завихрителе по сравнению с первым вариантом. Это привело к возникновению циркуляционного течения вблизи оси и перестройке всего течения в модуле с образованием обширной зоны обратного тока. В четвертом варианте расчета закрутка потока в центральном завихрителе осталась такой же, как в третьем варианте (т.е. увеличена в 4 раза по сравнению с первым), а во внешнем, тангенциальном, завихрителе уменьшена в 2 раза. В этом случае оказалось, что отрывная зона заходит внутрь завихрительного устройства. Векторное поле скорости в продольном сечении модуля для четвертого варианта расчета представлено на рис.2.

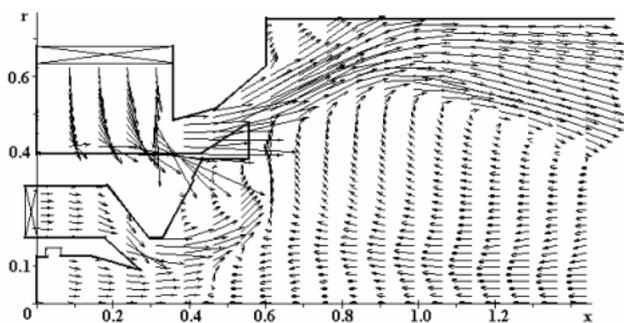


Рис.2. Расчетное векторное поле скорости в продольном сечении модуля.
Вариант 4 $u_{\varphi 1}^0=0.76$, $u_{\varphi 3}^0=1.88$

Отметим, что картина течения в третьем варианте расчетов ($u_{\varphi 1}^0=0.76$, $u_{\varphi 3}^0=3.76$) весьма

близка к приведенной. Однако распределения капель топлива в этих двух вариантах существенно различаются.

4. Распределение капельно-жидкого топлива

В расчетах задание начальных условий для топливных капель производилось в соответствии с теорией центробежных и струйных форсунок [6]. Среднезаулеровские диаметры капель согласно экспериментальным данным Свириденкова А.А. и др. приняты равными 50мкм. Предполагалось также, что топливные капли, попадающие на стенки модуля, образуют на них жидкие пленки, которые под действием воздушного потока смещаются в направлении острых кромок модуля, где и происходит их вторичный распыл. Поскольку экспериментальные данные по характеристикам этого распыла отсутствуют, то в расчетах использованы характеристики распыла пневматических форсунок [6]. При этом скорости воздушного потока в месте распыла принимались равными скоростям в узлах расчетной сетки, ближайших к соответствующей острой кромке со стороны движения топливной пленки. На рис. 3 и 4 приведены картины траекторий капель, спроецированных на продольное сечение модуля. Рис. 3 соответствует третьему варианту расчетов, рис.4 – четвертому. В обоих случаях рассматривается режим холодных испытаний ($T_w = T_k = 293K$ – температуры воздуха и капель). Расходы топлива через внутренний и наружный контуры равны 1.8 и 3.4 г/с.

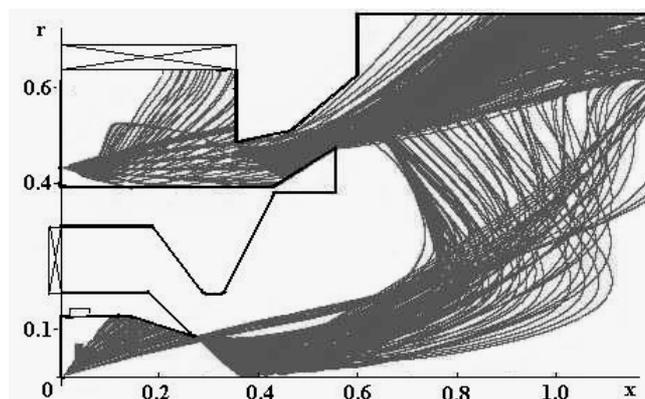


Рис. 3. Картина траекторий капель.
 Вариант 3 ($u_{\varphi 1}^0=0.76, u_{\varphi 3}^0=3.76$.) Режим холодных испытаний

Из рисунка видно, что в режиме холодных испытаний (режим запуска) значительная часть капель, распыленных пневматическими форсунками наружного контура, попадает на вход завихрительного устройства и стенку тангенциального завихрителя.

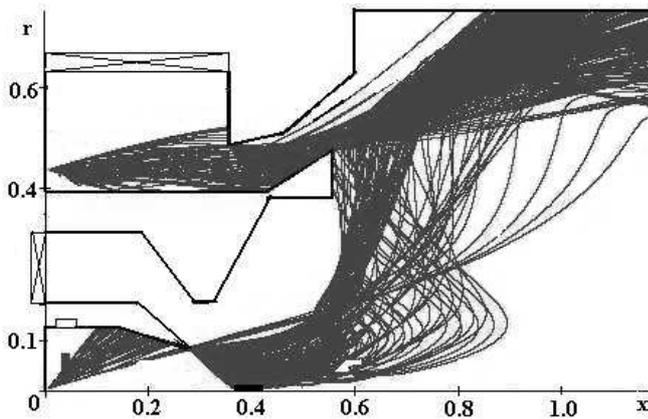


Рис. 4. Картина траекторий капель.
 Вариант 4 ($u_{\varphi 1}^0=0.76, u_{\varphi 3}^0=1.88$.) Режим холодных испытаний.

В то же время в варианте 4 массовая доля капель, попадающих на наружную стенку завихрителя, по сравнению с предыдущими вариантами уменьшилась более, чем на порядок - приблизительно с 60% до 1%. При этом исчезла сепарация капель на вход завихрителя. Это связано со снижением закрутки потока в тангенциальном завихрителе. Обращает на себя также внимание то, что капли, попавшие в рабочий объем модуля из наружного завихрителя, полностью сепарируются на внешнюю стенку камеры (34%). Последнее связано со значительной закруткой вытекающего из него воздушного потока. Отметим, что в местах попадания капель на стенки модуля создаются условия образования в этих областях горючих смесей. В реальности это может привести к местным прогарам стенок.

Качественная картина сепарации топлива на стенки тангенциального завихрителя

сохраняется и на других режимах, однако самым неблагоприятным режимом является режим холодных испытаний. Что касается центрального завихрителя, то при низких закрутках потока в нем ($Sw_1=0.2$) капли слабо сепарируются на стенку дефлектора и это отрицательно сказывается на равномерности распределения топлива в рабочем объеме модуля. При увеличении закрутки до $Sw_1=0.4$ и выше эта отрицательная тенденция полностью исчезает.

Во внешнем, тангенциальном завихрителе – наоборот: высокий уровень закрутки потока вызывает увеличение сепарации капель на вход завихрительного устройства и стенки. Снижение этой сепарации до приемлемого уровня достигается переходом от закрутки $Sw_3=3.77$ к закрутке 1.88, что соответствует изменению углов установки лопаток тангенциального завихрителя с 70° до 54° . Из сравнения рис.3 и 4 видно, что это снижение закрутки потока обеспечивает также попадание топливных капель непосредственно в область за стабилизатором, что благоприятно сказывается на запуске камеры и устойчивости ее работы на режиме малого газа. На рис.5 в качестве примера приведено распределение безразмерных массовых концентраций капельно-жидкого топлива C_k в продольном сечении модуля. Обезразмеривание проведено на величину плотности воздушного потока на входе.

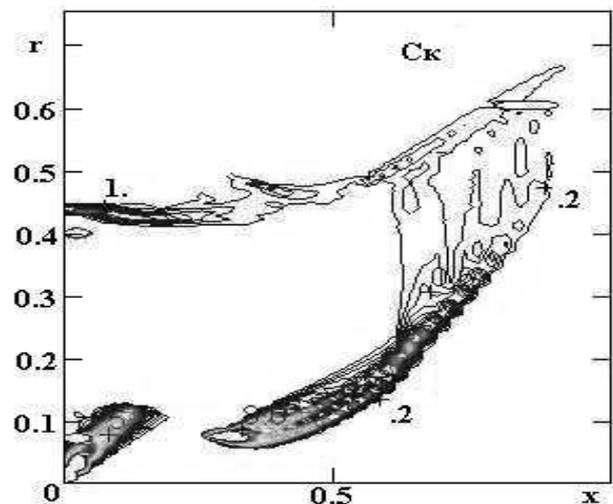


Рис.5. Изолинии безразмерных массовых концентраций топливных капель в продольном сечении модуля.

Вариант 4. Режим холодных испытаний

5. Расчет полей концентраций парообразного топлива

Расчеты показали, что при увеличении температуры воздушного потока количество топлива, попадающего на стенки модуля, а, следовательно, и доля топлива, распыливаемого с острых кромок, существенно уменьшается. В этих случаях о распределении топлива по объему модуля можно судить по распределениям концентраций топливных паров. Такие распределения для режима малого газа представлены на рис.6, а для крейсерского режима – на рис.7.

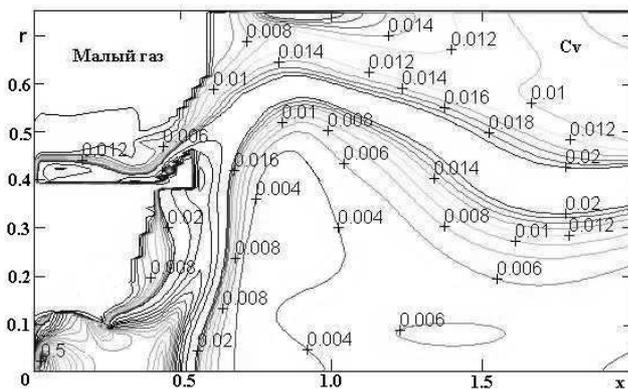


Рис.6. Профили безразмерных концентраций пара в продольном сечении модуля. Режим малого газа. Вариант 4

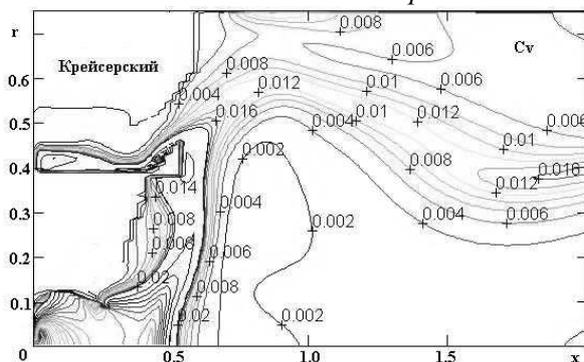


Рис.7. Профили безразмерных концентраций пара в продольном сечении модуля. Крейсерский режим. Вариант 4

Из сравнения распределений капельно-жидкого и парообразного топлива видно, что

эти распределения существенно отличаются друг от друга. Так, под разделяющей обечайкой находится область с заметной концентрацией топливных паров, а топливо в капельно-жидкой фазе в этой области практически отсутствует.

Отметим, что при увеличении температуры воздушного потока степень испарения топлива возрастает и топливные пары, увлекаемые этим потоком, сносятся в область стабилизатора. Это приводит к обеднению смеси в приосевой области течения, см. рис. 6 и 7. Так, в варианте 4 значение относительной концентрации пара C_v на режиме малого газа при $x = 1.0$ равно приблизительно 0.004, на крейсерском режиме – 0.002, а на максимальном – менее 0.001. Уменьшаются также и абсолютные значения концентраций в приосевой области. Отметим, что при отсутствии испарения капель заметная часть топлива сосредотачивается в приосевой области, [1].

При закрутках центрального потока ниже 0.4 ($u_{\phi 1}^0 = 0.19 \dots 0.38$) происходит обогащение парообразным топливом приосевой зоны. Это объясняется интенсивным осевым движением газового потока, связанным с отсутствием приосевой зоны обратного тока в первом варианте и расположением этой зоны на большом удалении от выходного сечения завихрителя во втором.

Таким образом, снижение закрутки потока в центральном завихрителе в некоторых режимах приводит к выравниванию распределения парообразного топлива по объему модуля.

6. Выводы

В результате решения получено, что наиболее равномерное распределение капельно-жидкого топлива из всех исследованных течений дает вариант 4 ($u_{\phi 1}^0 = 0.78$ и $u_{\phi 3}^0 = 1.88$). В этом варианте также реализуется наименьшее попадание капель на стенки и лопатки тангенциального завихрителя. Распределения концентраций топливного пара для всех режимов (от малого газа до макси-

мального) в варианте 4 оказались качественно весьма близкими: топливные пары уносятся воздушным потоком из центральной приосевой области в область стабилизатора. Отток топливных паров на периферию приводит к обеднению топливовоздушной смеси в приосевой области течения.

Результаты расчетов первого, второго и третьего вариантов течений показали, что снижение закрутки потока в центральном завихрителе приводит в некоторых режимах к обогащению топливовоздушной смеси в приосевой области течения и улучшению равномерности распределения парообразного топлива по объему модуля.

Показано, что для обеспечения приемлемого уровня сепарации капель на стенки наружного завихрителя и непопадания капель на его вход закрутку потока в тангенциальном завихрителе следует выбирать в окрестности величины $Sw_3 = 1.4$, что соответствует углу установки лопаток завихрителя 55° . Влияние закрутки потока в центральном завихрителе двоякое. С одной стороны увеличение этой закрутки приводит к образованию развитой приосевой зоны обратных токов, что положительно сказывается на процессе стабилизации пламени в этой области. С другой – наличие развитой приосевой зоны обратных токов приводит к интенсивному оттоку парообразного топлива от центра на периферию, и, как следствие, к обеднению топливовоздушной смеси в приосевой области и неравномерности распределения парообразного топлива по объему модуля. Приемлемым значением закрутки потока в центральном завихрителе можно считать $Sw_3 = 0.6 \dots 0.7$.

Подчеркнем, что представленные данные относятся лишь к рассмотренной конструкции модуля с односторонним вращением потоков в завихрителях, фиксированной системой топливоподачи и фиксированным распределением расходов воздуха через каждый завихритель.

7. Заключение

В результате проведенных расчетов установлено влияние основных конструктивных и режимных параметров на характеристики течения и распределения топлива в трехъярусном модуле камеры сгорания.

Найдены места попадания капель на стенки модуля, которые являются областями возможных прогаров стенок.

Даны рекомендации по совершенствованию конструктивных параметров модуля. Так, с целью непопадания топливных капель в закручивающие аппараты необходимо обеспечить закрутку внешнего потока $Sw_3 = 1.4 \dots 1.5$. Значения закрутки потока в центральном завихрителе для создания равномерного распределения парообразного топлива по объему модуля рекомендуется выбирать в пределах $Sw_3 = 0.6 \dots 0.7$.

Часть этих рекомендаций уже реализована на практике. Испытания такого трехъярусного модуля в составе двухгорелочного отсека камеры сгорания продемонстрировали снижение уровня эмиссий NO_x (EI_{NO_x} менее 4) при полноте сгорания η более 0.99.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований. Проект № 05-08-17942-а.

Список литературы

1. В.В. Третьяков. Расчет распределения топлива в трехъярусном форсуночном модуле камеры сгорания. ЦИАМ 2001-2005. Основные результаты научно-технической деятельности. Т.1. М.:ЦИАМ, 2005.- с.380-385.
2. Лебедев А.Б., Третьяков В.В. Обзор методов расчета распределения топлива в камерах сгорания. Труды ЦИАМ №1203, 1987.- 138с..
3. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984.- 150с.

4. Крашенинников С.Ю., Миронов А.К., Третьяков В.В. Расчетно-экспериментальное исследование поля течения в форсуночном модуле камеры сгорания схемы ТАПС.-Вторая Российская конференция «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». 15-17 марта 2005г., Москва, МЭИ (техн. университет). Матери-

алы конференции на CD. Гос. рег. №0320500321.

5. Сб. Отрывные течения в камерах сгорания. Под редакцией В.И.Ягодкина. Труды ЦИАМ №1203, 1987.- 138с..

6. Дитякин Ю.Ф. и др. Распыливание жидкостей. М., Машиностроение, 1977.- 208с.

DISTRIBUTION CALCULATION OF DROPWISE – LIQUID AND VAPOROUS FUEL IN COMBUSTION CHAMBER SPRAY – TYPE COMPONENT

© 2006 V.V. Tretiyakov

This work devoted to investigation of frontal device with 3-stage swirler for low-emission combustion chamber. The numerical model includes the Reynolds equations and Lagrangian individual droplet equations. Fuel distribution calculations were made for any real engine regimes. The results show large difference in vapour and liquid fuel phase concentration distributions.