

кации смещения продуктов неполного сгорания из «богатой» зоны с чистым воздухом в зоне QQ используется дробление масштаба применением смесительных устройств.

Достигнутые уровни эмиссии близки к опубликованным в работе.

В докладе анализируется применение технологии RQQL в стационарных и авиационных ГТД и ее преимущества по сравнению с технологией «бедного» горения.

УДК 621.45.022.2

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛА И РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТОПЛИВА В ТРЕХЪЯРУСНОМ ФОРСУНОЧНОМ МОДУЛЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ С ГОМОГЕНИЗАЦИЕЙ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ**

Третьяков В.В.

*Центральный институт авиационного моторостроения, г. Москва*

В настоящее время и в нашей стране, и за рубежом, ведутся активные поисковые исследования по созданию малоэмиссионных камер сгорания. Одним из направлений этих исследований являются модули камер сгорания, в которых гомогенизация горючей смеси достигается на стадии ее предварительной подготовки. Данная работа посвящена вопросам математического моделирования и расчетам концентраций капельно-жидкого топлива в форсуночном модуле камеры сгорания, разработанном в ЦИАМ.

Рассматриваемый модуль представляет собой трехъярусный завихритель, внутренняя часть которого выполнена в виде вихревой камеры смещения, в которой смешиваются воздушные струи, поступающие в камеру через систему тангенциальных отверстий, расположенных на боковой поверхности ее цилиндрической части. В торце цилиндра на его оси располагается центробежная топливная форсунка. Наружная часть центрального завихрителя представляет собой осевой лопаточный завихритель.

Наружная стенка центрального завихрителя заканчивается разделяющей обечайкой, отделяющей центральный двухъярусный завихритель от внешнего тангенциального. Закрутки потоков во всех завихрителях и центробежной форсунке осуществляются в одну и ту же сторону (односторонняя закрутка потоков). На торцевой поверхности внешнего завихрителя равномерно по окружности располагаются струйные форсунки. Подача топлива осуществляется вдоль оси модуля. Схема модуля изображена на рис. 1.

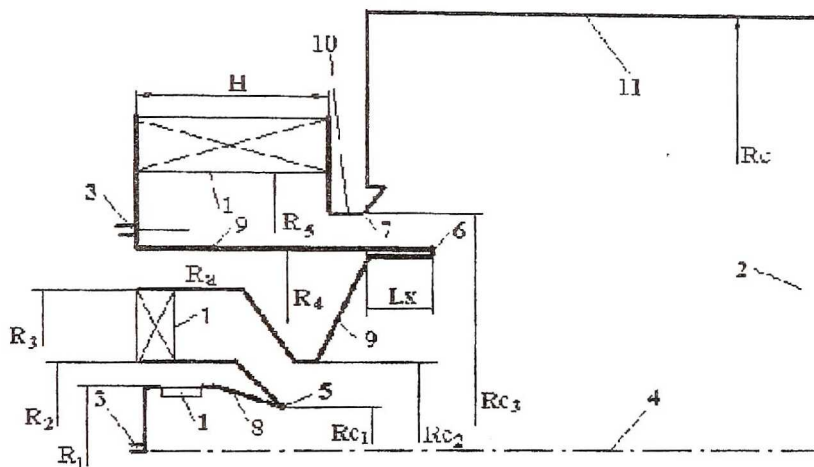


Рис. 1. Схема расчетной области

На схеме цифрами 1 обозначены сечения входа, в которых задавались значения всех трех компонент скорости воздуха. Цифрой 2 обозначено сечение выхода топливовоздушной смеси, цифрой 3 - места подачи топлива, 4 - ось модуля. Цифрам 5, 6 и 7 соответствуют острые кромки дефлектора, разделяющей обечайки и козырька тангенциального завихрителя; цифрам 8, 9, 10 и 11 - стенки модуля.

Данная работа представляет собой объединение в единой методике моделей расчета течения и распределения топлива с моделью каскадного распыливания топлива. Методика расчета состоит из расчета течения газа в области, моделирующей рабочую часть трехъярусного завихрителя, и расчета распределения топлива в этой области. Первая основана на интегрировании полной системы уравнений Рейнольдса, записанных в переменных Эйлера и замыкаемых по двухпараметрической модели тур-

булентности; вторая - на решении системы уравнений движения, нагрева и испарения отдельных капель, записанных в переменных Лагранжа. При этом уравнения, описывающие стационарное турбулентное движение газовой фазы, записываются в следующей консервативной форме:

$$\operatorname{div}(\rho U \varphi - \Gamma \varphi \operatorname{grad} \varphi) = S \varphi \quad (1)$$

Здесь  $U$  – вектор осредненной скорости,  $\varphi$  – зависимая переменная,  $\Gamma_\varphi$  – коэффициент диффузионного переноса,  $\rho$  – плотность,  $S_\varphi$  – источниковый член. Записанная в виде (1) система уравнений неразрывности ( $\varphi \equiv 1$ ,  $\Gamma_\varphi \equiv 0$ ,  $S_\varphi \equiv 0$ ) и движения ( $\varphi = U_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ) решалась конечно-разностным итерационным методом Гаусса-Зайделя. Для нахождения коэффициентов турбулентной диффузии использовалась гипотеза Бусинеска о линейной зависимости компонент тензора турбулентных напряжений от компонент тензора скоростей деформации среднего движения и два уравнения переноса характеристик турбулентности. Выражения для источниковых членов, а также подробное описание использованной модели турбулентности можно найти в работе [1]. Так как система определяющих уравнений является эллиптической, то для ее решения необходимо задать условия на всех границах расчетной области. На входе задавались профили скоростей и характеристик турбулентности. На выходе для всех зависимых переменных ставились условия плоскопараллельного течения  $\partial \varphi / \partial x = 0$ . В качестве граничного условия на твердых стенках ставилось равенство нулю компонент осредненной скорости, энергии и диссипации энергии турбулентности. Условие для давления состояло в задании его значения в какой-либо произвольной точке расчетной области. О методике расчета характеристик течения и концентраций топлива более подробные сведения можно найти в сборнике [2].

Что касается распределения топлива в рабочем объеме модуля, то методика его расчета дополняется предположением о том, что капли топлива, попавшие на стенки модуля, образуют на них жидкие пленки, которые, перемещаясь под действием воздушных потоков, достигают острых кромок дефлектора (5), разделяющей обечайки (6) и козырька (7), где и происходит вторичное образование капель. Поскольку экспериментальные данные по характеристикам этого, так называемого каскадного, распыла отсутствуют, то в расчетах моделировалось распыли-

вание в форсунках [3]. При этом скорости воздушного потока в месте распыла принимались равными соответствующим скоростям в узлах расчетной сетки, ближайших к соответствующей острой кромке со стороны движения топливной пленки. Расходы распыленной с острых кромок жидкости принимались равными массе жидкости, попадающей на соответствующие стенки модуля в единицу времени.

В расчетах гидродинамики течения предполагалось, что входные профили скорости за завихрителями являются равномерными, а эффективные углы входа струй соответствуют средним углам установки лопаток и равны для центрального завихрителя  $\alpha_1 = 70^\circ$ , осевого  $\alpha_2 = 60^\circ$  и тангенциального  $\alpha_3 = 70^\circ$ . За характерный размер  $H_0$  принят радиус сопла внешнего тангенциального завихрителя модуля. Характерной скоростью  $U_0$  считалась среднерасходная скорость воздушного потока в ми-делевом сечении сопла внешнего тангенциального завихрителя.  $H_0 = 10\text{мм}$ ,  $U_0 = 20\text{м/с}$ . К этим величинам отнесены все линейные размеры и скорости.

Расчеты проведены при следующих значениях компонент скорости газа на входе в модуль (основной вариант):  $u_{r1}^0 = -0,5$ ,  $u_{\varphi 1}^0 = 1,0$ ;  $u_{z2}^0 = 0,35$ ,  $u_{\varphi 2}^0 = 0,35$ ;  $u_{r3}^0 = 0,5$ ,  $u_{\varphi 3}^0 = 1,0$ . Здесь индексы  $z$ ,  $r$  и  $\varphi$  относятся к осевой, радиальной и тангенциальной безразмерным координатам, а индексы 1, 2 и 3 - соответственно к центральному, осевому и тангенциальному завихрителям. Безразмерные значения энергии турбулентности и турбулентной вязкости на входе приняты следующими:

$$k = 6 \cdot 10^{-2}, \nu_T = 5 \cdot 10^{-3}.$$

На рисунке 2 представлен результат расчета в виде векторного поля скорости в продольном сечении модуля.

Из рисунка видно, что в приосевой области профили скорости носят претотрывный характер, в месте резкого расширения потока в пристенной области имеет место развитая зона обратных токов, циркуляционное движение наблюдается и в центральной области, за разделяющей обечайкой и в следе за козырьком также находятся слаборазвитые зоны обратных токов.

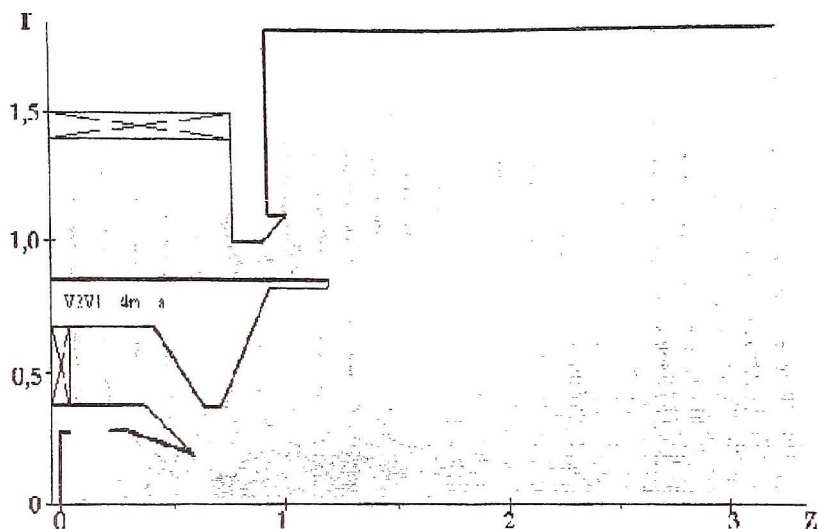


Рис. 2. Поле скорости в продольном сечении модуля

При расчетах распределения капельножидкого топлива в рабочем объеме модуля считалось, что факел распыла имеет полидисперсную структуру: диапазон изменения диаметров капель составляет от 5 до 300 мкм, распределение капель по размерам подчиняется закону Розена-Раммлера с показателем  $n = 3$ , а угловое распределение капель – нормальному закону. Расчеты проведены для форсунок, разработанных в ЦИАМ. Значения безразмерных скоростей вылета капель приняты равными для центробежной форсунки  $v_{K,1}^0 = 0,135$ , для струйной  $v_{K,2}^0 = 0,5$ , в соответствии с их рабочими режимами и оценок по теории центробежных и струйных форсунок [3]. Углы вылета капель из центробежной форсунки по отношению к оси модуля  $\psi$  находились в диапазоне от  $10^\circ$  до  $50^\circ$ , что соответствовало углу раскрытия факела  $\alpha = 100^\circ$ . Для струйных форсунок полагалось, что распыл происходит вдоль оси  $z$  внутри угла  $\varphi_0 = 20^\circ$ . Среднезаулеровские диаметры капель  $D_{32}$  приняты равными 60 мкм. Расчеты выполнены для керосина ТС-1, [4]. При расчетах вторичного распыливания для величины  $D_{32}$  принималось значение

85мкм и считалось, что распределение капель по углам  $\varphi$  и  $\psi$  являются нормальными с параметрами  $\varphi_0 = \psi_0 = 10^\circ$ .

Результаты расчетов показали, что при отсутствии вторичного распыла распределения концентраций капельно-жидкого топлива в поперечных сечениях рабочего объема модуля существенно неравномерные, причем в этом случае основная часть топлива концентрируется в центральной области за сечением внезапного расширения. Таким образом наблюдаемая в экспериментах относительная равномерность концентраций топлива в выходном сечении модуля связана с процессом его вторичного распыла с острых кромок. В данном случае - с кромок дефлектора, разделяющей обечайки и козырька внешнего тангенциального завихрителя.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты расчетов распределения топлива в виде профилей безразмерных концентраций  $C_K$  капельно-жидкого топлива, осредненных по углу  $\varphi$ . Рисунок 3 соответствует первичному распылу, рисунок 4 - каскадному.

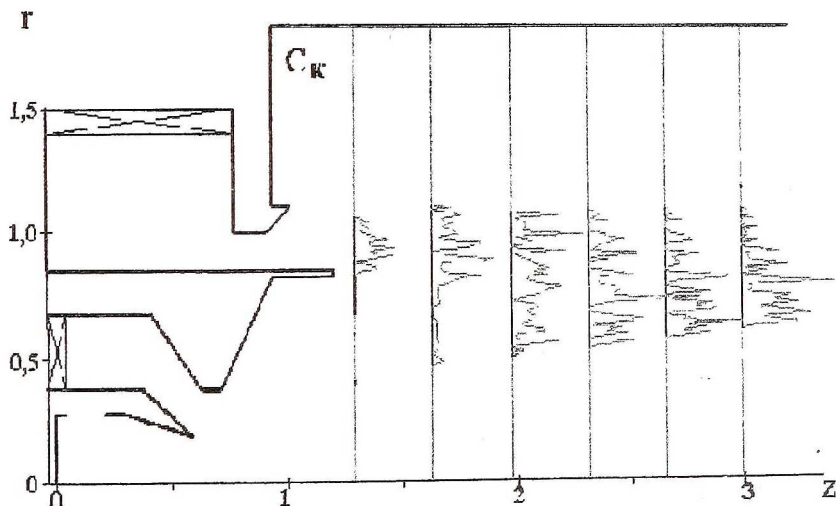


Рис. 3. Профили безразмерных концентраций капель в продольном сечении модуля при первичном распыле топлива

Из сравнения графиков видно, что поле концентраций является более однородным при каскадном распыле, когда часть топлива, распы-

ленного форсунками и попавшая на стенки модуля, вновь возвращается в его рабочий объем.

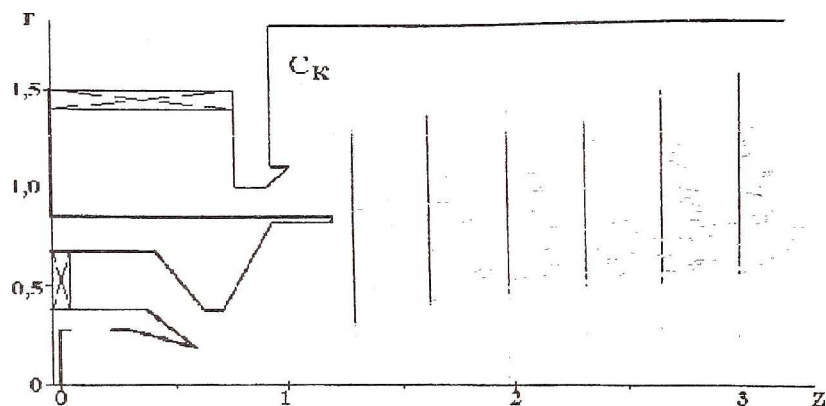


Рис. 4. Профили безразмерных концентраций капель в продольном сечении модуля при многостадийном распыле топлива

Это прежде всего выражается в большем заполнении каплями областей над козырьком и под разделяющей обечайкой. Кроме того, область центрального вихря имеет практически однородное распределение концентраций в поперечном направлении. Для большей наглядности на рисунке 5 представлены картины траекторий капель, спроектированных на продольное сечение модуля для случая двухстадийного распыла.

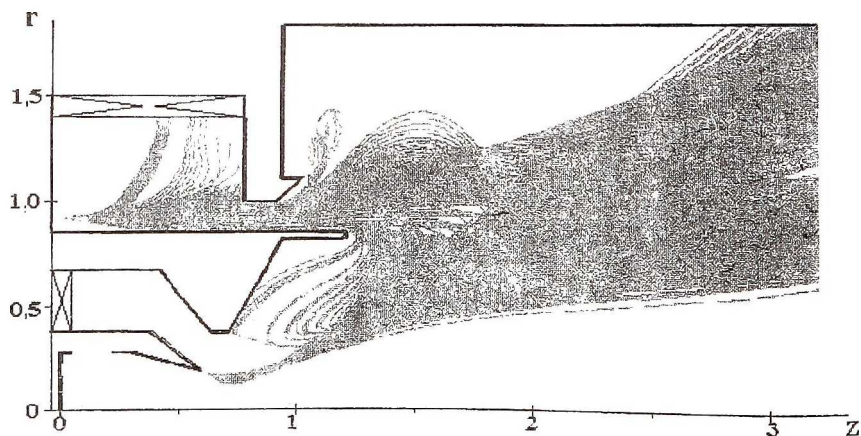


Рис. 5. Картины траекторий капель при многостадийном распыле топлива

На рисунке видны траектории капель над козырьком, под разделяющей обечайкой и вблизи торцев форсунок центрального и тангенциального завихрителей. В этих областях наблюдается вовлечение мелких капель в возвратно-циркуляционное течение. Последнее позволяет понять роль разделяющей обечайки в формировании полей концентраций. Эта роль двоякая. Во первых, с острой кромки разделяющей обечайки осуществляется вторичный распыл топлива. И, во вторых, именно капли, образующиеся при этом вторичном распыле, формируют поле концентраций в области под обечайкой, поскольку из основного топливного потока в рециркуляционную зону под обечайкой попадает лишь незначительная часть топлива. Обращает на себя внимание отсутствие топливных капель в приосевой области модуля. Этому есть по крайней мере два объяснения. Во-первых, на срезе сопла центрального завихрителя в рассмотренных режимах образуются предотрывные течения с положительным направлением радиальной составляющей скорости газового потока, увлекающие капли на периферию. Аналогичное же действие оказывает и закрутка потока. Эта вторая причина оттока капель от оси модуля представляется в данном случае более значимой.

Разработанная методика расчета позволяет также выявить влияние режимных параметров на распределение топлива. Так, были исследованы следующие режимы течения. Вариант 2:  $u_{r1}^0 = -0,25$ ,  $u_{\varphi 1}^0 = 1,5$ ;  $u_{z2}^0 = 0,35$ ,  $u_{\varphi 2}^0 = 0,35$ ;  $u_{r3}^0 = -0,2$ ,  $u_{\varphi 3}^0 = 0,3$ . Вариант 3:  $u_{r1}^0 = -0,5$ ,  $u_{\varphi 1}^0 = 1,5$ ;  $u_{z2}^0 = 0,35$ ,  $u_{\varphi 2}^0 = 0,35$ ;  $u_{r3}^0 = -0,2$ ,  $u_{\varphi 3}^0 = 0,3$ .

Расчеты показали, что в обоих последних вариантах вторичный распыл приводит к более равномерным распределениям концентраций топлива, однако по сравнению с основным, первым, вариантом топливо по разному распределяется в поперечных сечениях модуля. Так, в варианте 2 топливо сосредотачивается в следе за разделяющей обечайкой, а в варианте 3 - в пристенной области. Поскольку в последнем случае в рабочий объем модуля поступал более закрученный воздушный поток, то это, естественно, вызвало усиление сепарации капель на внешнюю стенку модуля. С другой стороны, уменьшение потока, текущего через тангенциальный завихритель, приводит к образованию в центральной области более интенсивного, чем в других случаях, циркуляционного дви-



жения и более интенсивного захвата им топливных капель, что приводит к увеличению их концентрации капель в этой области.

Таким образом, представленная модель каскадного распыла топлива продемонстрировала существенное влияние вторичного распыла топлива на формирование концентрационных полей. Показано, что разработанная методика может быть использована для анализа влияния конструктивных и режимных параметров смесительных устройств на распределения концентраций топлива в них.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патанкар С.С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 150 с.
2. Ягодкин В.И. Отрывные течения в камерах сгорания. Сб. трудов ЦИАМ. Москва, 1987г. № 1203. - 138 с.
3. Дитякин Ю.Ф. и др. Распыливание жидкостей. - М.: Машиностроение, 1977. - 208 с.
4. Дубовкин И.Ф. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив. Справочник. - М.: Химия, 1985. - 240 с.

УДК 621.45.03

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ НК-38СТ

Цыбизов Ю.И., Беляев В.В.

*ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара*

Численный расчет параметров газа в исследуемой области проточной части камеры сгорания (КС) ГТД и ГТУ в настоящее время проводится по одномерным полуэмпирическим зависимостям, дающим значительную погрешность вычислений. Используемые зависимости получены для определенных конструкций элементов КС (диффузора, фронтального устройства, горелок, жаровой трубы, системы охлаждения и т.д.) при обобщении огромного количества экспериментальных данных, по-