

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОПЛИВА В ФОРСУНОЧНОМ МОДУЛЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

© 2006 В. В. Третьяков

Центральный институт авиационного моторостроения, г. Москва

Представлены результаты расчетов течения и концентраций капельно-жидкого топлива в форсуночном модуле камеры сгорания. Использованная численная модель учитывает двухстадийность распыла топлива. Выявлено существенное влияние вторичного распыла на формирование полей концентраций капельно-жидкого топлива. Показано, что разработанная методика может быть использована для анализа влияния конструктивных и режимных параметров смесительных устройств на распределения концентраций топлива в них.

В настоящее время ведутся активные поисковые исследования по созданию малоэмиссионных камер сгорания (КС). Одним из направлений этих исследований являются модули КС, 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 КС. Рассматриваемый модуль представляет собой трехъярусный завихритель. Схема модуля и расчетная область изображены на рис. 1.

Внутренняя часть завихрителя выполнена в виде вихревой камеры смешения, в которой смешиваются воздушные струи, по-

ступающие через систему тангенциальных отверстий 1, расположенных на боковой поверхности ее цилиндрической части. В торце цилиндра на его оси располагается центробежная топливная форсунка 5. Наружная часть центрального завихрителя представляет собой осевой лопаточный завихритель 2. Между этими двумя ярусами центрального завихрителя располагается дефлектор. Снаружи завихритель ограничен стенкой. Наружная стенка центрального завихрителя заканчивается разделяющей обечайкой, отделяющей центральный двухъярусный завихритель от внешнего тангенциального завихрителя 3. Закрутки потоков во всех трех завихрителях одинаковы и по направлению совпадают с

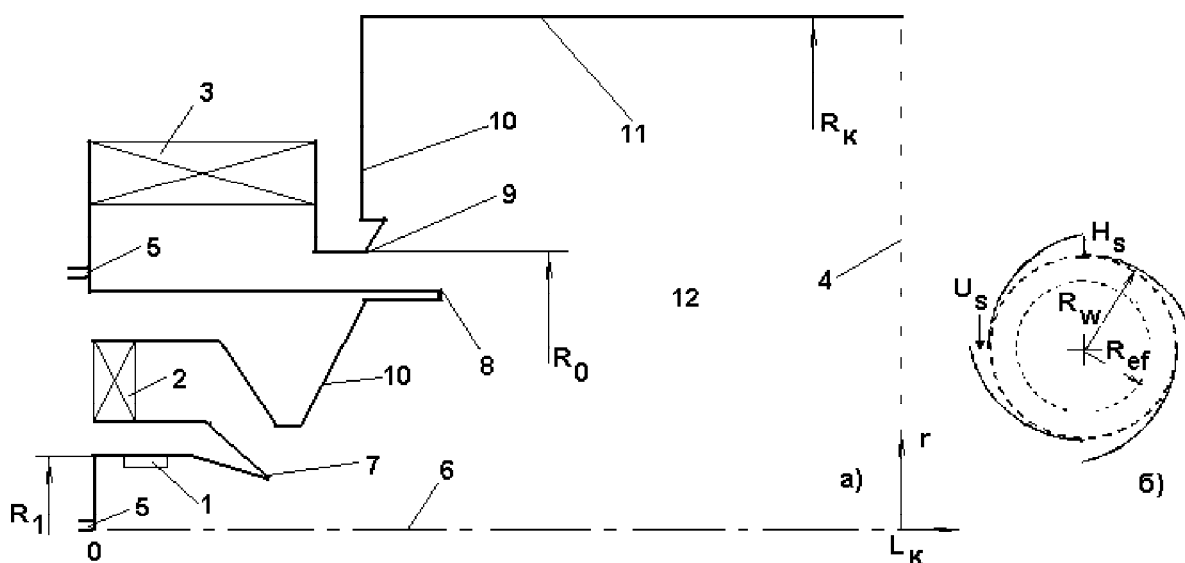


Рис. 1. Схема модуля и расчетная область (а), поперечное сечение камеры смешения (б):
1 - центральный завихритель; 2 - осевой завихритель; 3 - тангенциальный завихритель; 4 - сечение выхода топливовоздушной смеси; 5 - места подачи топлива; 6 - ось модуля; 7, 8 и 9 - острые кромки дефлектора, разделяющей обечайки и козырька тангенциального завихрителя; 10 - стенки модуля; 11 - наружная стенка модуля; 12 - камера смешения

направлением закрутки в центробежной форсунке (односторонняя закрутка потоков). На торцевой поверхности внешнего завихрителя равномерно по окружности располагаются струйные форсунки 5. Подача топлива в них осуществляется вдоль оси модуля.

Данная работа является продолжением расчетных исследований течений и распределений топлива в камерах сгорания и ее элементах и объединяет в единой методике модели расчета течения и распределения топлива в камерах сгорания. Расчетное исследование состоит из двух частей: 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 турбулентности $k-\epsilon$; 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:

$$\operatorname{div}(rU\Phi - \Gamma_{\Phi} \operatorname{grad} \Phi) = S_{\Phi}. \quad (1)$$

Здесь U – вектор осредненной скорости, Φ – зависимая переменная, Γ_{Φ} – коэффициент диффузионного переноса, r – плотность, S_{Φ} – источниковый член.

Система уравнений (1) неразрывности ($\Phi \equiv 1$, $\Gamma_{\Phi} \equiv 0$, $S_{\Phi} \equiv 0$) и движения ($\Phi = U_z$, U_r , U_j ; z, r, j – цилиндрическая система координат) решалась конечно-разностным итерационным методом Гаусса-Зайделя. Для нахождения коэффициентов турбулентной диффузии использовалась гипотеза Буссинеска о линейной зависимости компонент тензора турбулентных напряжений от компонент тензора скоростей деформации среднего движения и два уравнения переноса характеристик турбулентности k и ϵ . Выражения для источниковых членов, а также описание использованной модели турбулентности даны в [1, 2].

Так как система определяющих уравнений является эллиптической, то для ее реше-

ния необходимо задать условия на всех границах расчетной области. На входе (непосредственно за завихрителями) задавались профили скоростей, температуры и характеристик турбулентности. В выходном сечении для всех зависимых переменных ставились условия плоскопараллельного течения, т. е. $\partial\Phi/\partial z = 0$. В качестве граничного условия на твердых границах использовался так называемый “закон стенки”, на оси модуля – условия симметрии. Условие для давления состояло в задании его значения в какой-либо произвольной точке расчетной области. Методика расчета характеристик течения изложена в [2]. При моделировании потока в вихревой камере дополнительно предполагается, что воздух поступает из внутреннего центрального завихрителя под некоторым углом к стенкам камеры b_{ef} и движется в слое $R_w - H_s < r < R_w$ (рис. 1б, на котором схематически изображено поперечное сечение вихревой камеры, проходящее через центры отверстий). Здесь R_w – радиус стенки, равный R_l (рис. 1а), H_s – высота канала подачи воздуха. Считалось, что в слое $R_w - H_s < r < R_w$ воздушный поток сохраняет свои “входные” параметры на протяжении одной секции, т. е. на расстоянии, равном шагу между отверстиями, так что соответствующие профили скоростей можно задавать на некоторой “эффективной” поверхности (радиус этой поверхности обозначен как R_{ef}). Кроме того, считалось, что профили тангенциальной составляющей скорости U_j в слое $R_{ef} - d < r < R_{ef}$ являются равномерными по радиусу. Принятие этих условий позволяет свести реальную трехмерную задачу к двумерной. Сравнение результатов тестовых расчетов в камере смешения с экспериментальными данными по профилям осевой и тангенциальной составляющих скорости показало их приемлемое согласование.

При расчетах течений считалось, что входные профили скорости за завихрителями являются равномерными, а параметрами закрутки Sw_1 , Sw_2 и Sw_3 являются соответственно значения тангенсов эффективного угла входа струй в центральный завихритель (Sw_1) и средних углов установки лопаток осевого (Sw_2) и тангенциального (Sw_3) завихри-

телей: $Sw=tg\alpha$ ($\alpha_2=60^\circ$, $\alpha_3=70^\circ$). За характерный размер принят наружный радиус сопла тангенциального завихрителя: $H_0=37$ мм. К этой величине отнесены все линейные размеры задачи. Длина камеры принята равной: $L=6\cdot H_0$. Характерной скоростью U_0 считалась среднерасходная скорость потока в миделевом сечении сопла тангенциального завихрителя, $U_0=20$ м/с.

Расчеты проведены при следующих значениях компонент скорости газа на входе в модуль: $u_{r1}^0=-0,5$, $u_{j1}^0=1,0$; $u_{z2}^0=0,35$, $u_{j2}^0=0,35$; $u_{r3}^0=-0,5$, $u_{j3}^0=1,0$ (вариант 1). Здесь индексы z , r и j относятся соответственно 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 рис. 2 представлен результат расчета течения в виде векторного поля скорости в продольном сечении модуля.

Из рисунка видно, что в приосевой области вблизи устья центрального завихрителя профили скорости носят предотрывный характер, а в месте резкого расширения потока в пристенной области имеется развитая зона обратных токов. В центральной области также наблюдается циркуляционное движение. Сложный вид течения имеет место и внутри наружного тангенциального завихрителя. Здесь так же, как в вихревой камере

смещения центрального завихрителя, в области за разделяющей обечайкой и в следе за козырьком находятся слаборазвитые зоны обратных токов.

Методика расчета концентраций топлива аналогична изложенной в [2]. Она основана на расчете движения отдельных капель в заданном газодинамическом поле. Не учитываются процессы нагрева и испарения капель, а также влияние на их движение пульсаций скорости воздушного потока и изменение формы капель во время движения. Капли считаются сферическими частицами. В этом случае движение отдельной капли описывается обыкновенным дифференциальным уравнением вида

$$m \frac{dV_i}{dt} = R_i, \quad (2)$$

где m – масса капли, V_i – i -й компонент ее скорости ($i=1, 2, 3$; $V_1=V_z$, $V_2=V_r$, $V_3=V_j$), R – сила аэродинамического сопротивления: $R_i=0,5C_d S_r W W_i$, $C_d=24Re^{-1}+4,4Re^{-0,5}+0,32$ – коэффициент сопротивления, S – площадь миделевого сечения капли, $W=V-U$ – скорость капли относительно газа, $Re=rDW/m$ – число Рейнольдса капли, D – диаметр капли, m – динамическая вязкость воздуха.

При расчетах распределения капельно-жидкого топлива в рабочем объеме модуля считалось, что факел распыла имеет полидисперсную структуру: диапазон изменения диаметров капель составляет от 5 до 300 мкм,

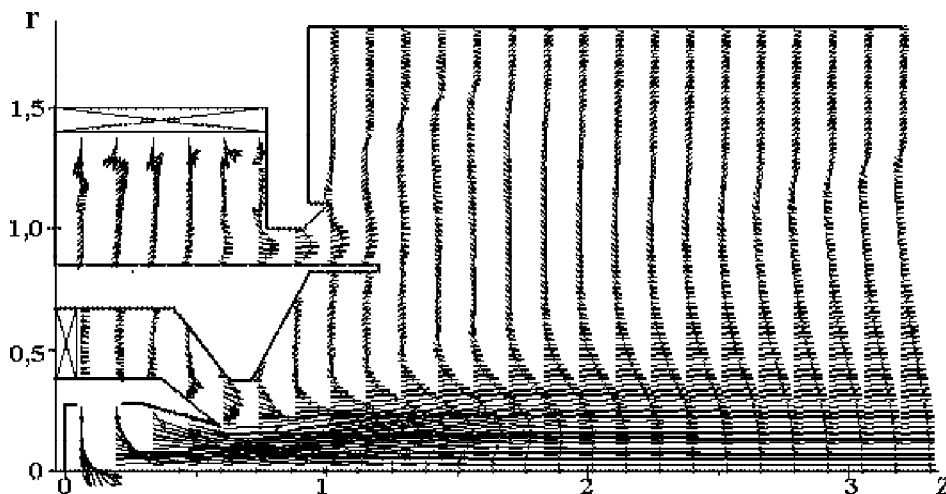


Рис. 2. Поле скорости в продольном сечении модуля.
Вариант 1: $u_{r1}^0=-0,5$, $u_{j1}^0=1,0$; $u_{z2}^0=0,35$, $u_{j2}^0=0,35$; $u_{r3}^0=-0,5$, $u_{j3}^0=1,0$

распределение капель по размерам подчиняется закону Розена-Раммлера с показателем $n = 3$, а угловое распределение капель – нормальному закону:

$$\Omega = 1 - \exp[-(D/D_m)^n],$$

$$dw/dt = K/y_0 \exp[-4,5((y-y_m)/y_0)^2]. \quad (3)$$

Здесь Ω - относительная доля капель, диаметр которых меньше D ; $D_m = 1,2D_{32}$ – среднегеометрический и D_{32} – среднезауэтеровский диаметры капель; w - относительная доля капель, вылетающих под углами, меньшими y ; y_0 – угол полураствора факела распыла; y_m – угол впрыска топлива; K – нормировочный коэффициент.

Расчеты проведены для форсунок, разработанных в ЦИАМ, для которых безразмерные скорости вылета капель приблизительно равны $v_{к,л}^0 = 0,135$ из центробежной форсунки и $v_{к,л}^0 = 0,5$ - из струйной. Углы вылета капель из центробежной форсунки по отношению к оси модуля y находились в диапазоне от 10^0 до 50^0 , что соответствовало углу раскрытия факела $\alpha = 100^0$. Для струйных форсунок полагалось, что распыл происходит вдоль оси z внутри угла $j_0 = 20^0$. На основе автономных испытаний форсунок установлено, что среднезауэтеровский диаметр капель в факелах распыла D_{32} равнялся для центробежных форсунок 64 мкм, для струйных - 80 мкм. Расчеты выполнены для керосина ТС-1 [4].

При расчетах распределения топлива в рабочем объеме модуля предполагается, что капли топлива, попавшие на стенки модуля, образуют на них жидкие пленки, которые, перемещаясь под действием воздушных потоков, достигают острых кромок соответственно дефлектора, разделяющей обечайки и козырька, где и происходит вторичное образование капель. Поскольку экспериментальные данные по характеристикам этого распыла отсутствуют, то в расчетах моделировалось распыливание в форсунках [5]. 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. При расчетах вторичного распыливания считалось также, что распределение капель по размерам носит универсальный характер, т. е. подчиняется закону Розена-Раммлера с показателем $n=3$, а направление вылета капель совпадает с направлением касательной к соответствующей поверхности, на которой образуется топливная пленка вблизи места распыла. Распределения капель по углам j и y являются нормальными с параметрами $j_m = 0^0$ и $j_0 = y_0 = 10^0$. Для величины D_{32} принималось значение 85 мкм.

Результаты расчетов показали, что при отсутствии вторичного распыла распределения концентраций капельно-жидкого топлива в поперечных сечениях рабочего объема модуля существенно неравномерные, причем в рассматриваемом случае основная часть топлива концентрируется в центральной области за сечением внезапного расширения. Параметрическими расчетами установлено, что для других режимов течения ситуация аналогична. 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 это кромки дефлектора, разделяющей обечайки и козырька внешнего тангенциального завихрителя.

На рис. 3 и 4 представлены результаты расчетов распределения топлива в виде профилей безразмерных концентраций C_k капельно-жидкого топлива, осредненных по углу j . Рис. 4 соответствует первичному распылу форсунками, рис. 5 – двухстадийному распылу.

Из сравнения графиков видно, что поле концентраций во втором случае является более однородным, т. к. часть топлива, распыленного форсунками и попавшая на стенки модуля, вновь возвращается в его рабочий объем после распыла с острых кромок. При этом в области центрального вихря распределение концентраций в радиальном направлении является практически однородным.

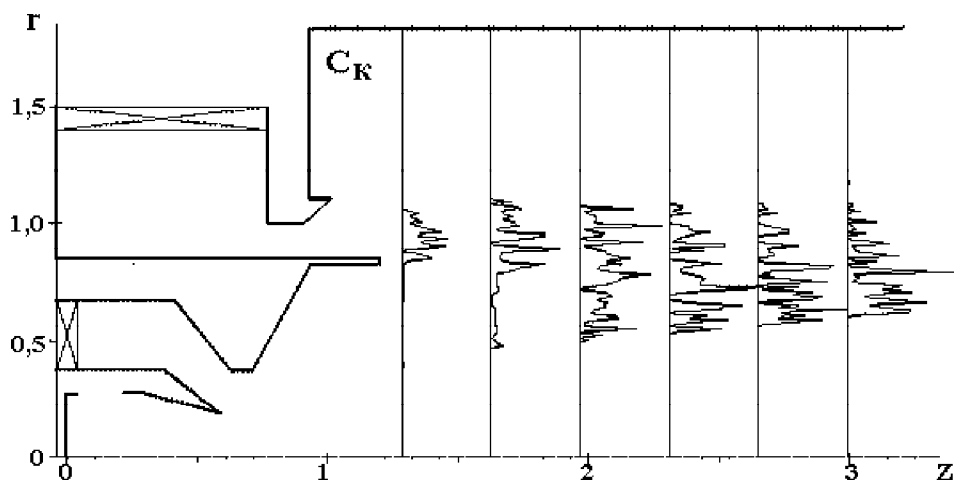


Рис. 3. Профили безразмерных концентраций капель в продольном сечении модуля при распыле топлива форсунками. Вариант 1

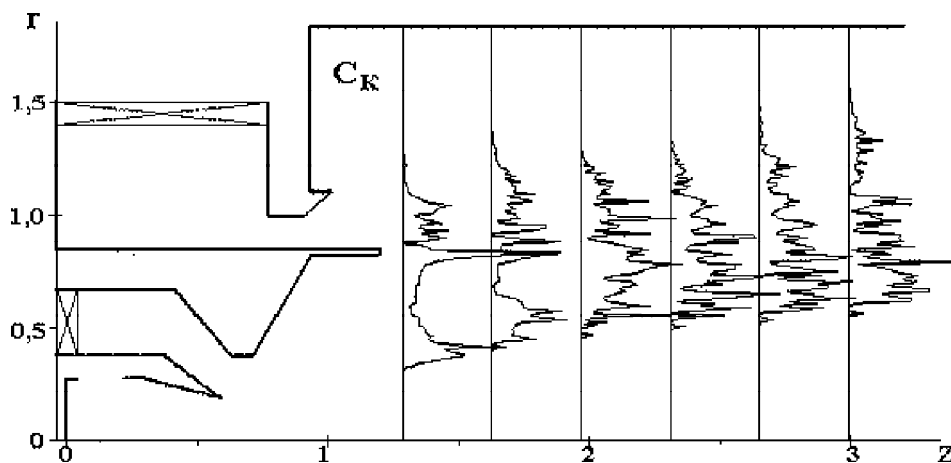


Рис. 4. Профили безразмерных концентраций капель в продольном сечении модуля при двухстадийном распыле топлива. Вариант 1

Кроме того, топливные капли проникают в область над козырьком и под разделяющую обечайку. Для большей наглядности на рис. 5 представлена картина траекторий капель, спроектированных на продольное сечение модуля для случая двухстадийного распыла.

На рисунке видны спиралевидные траектории капель над козырьком, под разделяющей обечайкой и вблизи торцов форсунок центрального и тангенциального завихрителей. В этих областях наблюдается вовлечение мелких капель в возвратно-циркуляционное течение. Рис. 5 позволяет понять двоякую роль разделяющей обечайки в формировании полей концентраций. Во-первых, с острой кромки разделяющей обечайки осуще-

ствляется вторичный распыл топлива, 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. Это можно объяснить тем, что 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, которая является второй причиной сме-

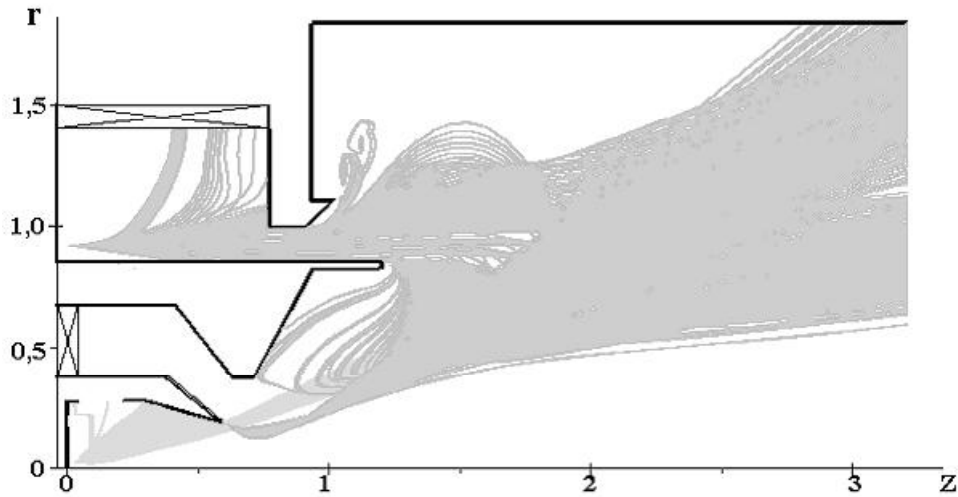


Рис. 5. Картины траекторий капель при двухстадийном распыле топлива.
 Вариант 1: $u_{r1}^0 = -0,5$, $u_{j1}^0 = 1,0$; $u_{z2}^0 = 0,35$, $u_{j2}^0 = 0,35$; $u_{r3}^0 = -0,5$, $u_{j3}^0 = 1,0$

щения каплей в радиальном направлении. Эта причина представляется в данном случае более значимой.

Разработанная методика расчета позволяет выявить влияние режимных параметров на распределение топлива. Были исследованы режимы течения с уменьшенными расходами воздуха через тангенциальный завихритель, уменьшенным расходом воздуха через центральный канал и увеличенной закруткой потока в центральном завихрителе. Этим режимам соответствуют второй и третий варианты расчетов: $u_{r1}^0 = -0,25$, $u_{j1}^0 = 1,5$; $u_{z2}^0 = 0,35$, $u_{j2}^0 = 0,35$; $u_{r3}^0 = -0,2$, $u_{j3}^0 = 0,3$ (вариант 2); $u_{r1}^0 = -0,5$, $u_{j1}^0 = 1,5$; $u_{z2}^0 = 0,35$, $u_{j2}^0 = 0,35$; $u_{r3}^0 = -0,2$, $u_{j3}^0 = 0,3$ (вариант 3).

Расчеты показали, что в обоих вариантах поля скоростей весьма близки к приведенным на рис. 2. Однако в соответствующих им полях концентраций имеются существенные различия, что хорошо видно из рис. 6 и 7.

В этих случаях вторичный распыл также приводит к более равномерным распределениям концентраций топлива, однако по сравнению с основным, первым вариантом, топливо по-разному распределяется в поперечных сечениях модуля: 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, есте-

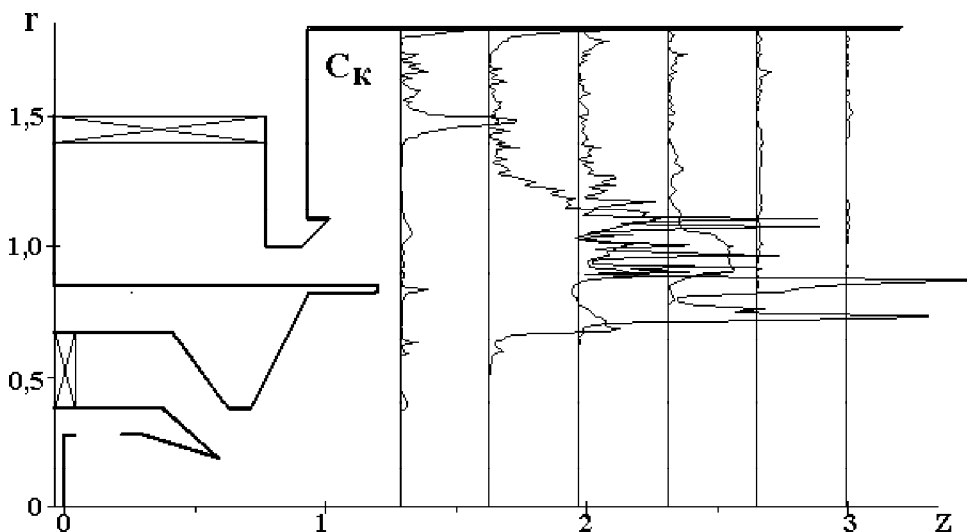


Рис. 6. Профили безразмерных концентраций капель в продольном сечении модуля при двухстадийном распыле топлива. Вариант 2: $u_{r1}^0 = -0,25$, $u_{j1}^0 = 1,5$; $u_{z2}^0 = 0,35$, $u_{j2}^0 = 0,35$; $u_{r3}^0 = -0,2$, $u_{j3}^0 = 0,3$

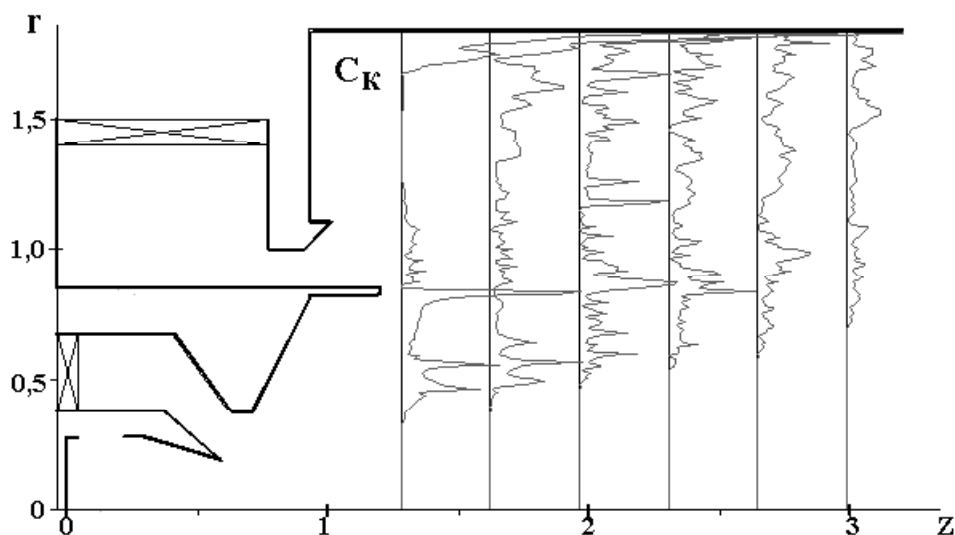


Рис. 7. Профили безразмерных концентраций капель в продольном сечении модуля при двухстадийном распыле топлива. Вариант 3 : $u_{r1}^0 = -0,5$, $u_{j1}^0 = 1,5$; $u_{r2}^0 = 0,35$, $u_{j2}^0 = 0,35$; $u_{r3}^0 = -0,2$, $u_{j3}^0 = 0,3$

ственно, 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 движения и более интенсивного захвата им топливных капель, что ведет к увеличению их концентрации в этой области.

Таким образом, представленные расчеты выявили существенное влияние вторичного распыла на формирование полей концентраций. Эти поля более «чувствительны» к изменениям конструктивных и режимных параметров по сравнению с полями скорости течения. Тем самым продемонстрировано, 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.
2. Сб. Отрывные течения в камерах сгорания / Под ред. В. И. Ягодкина. - Труды ЦИАМ, № 1203, 1987.
3. Лебедев А. Б., Третьяков В. В. Обзор методов расчета распределения топлива в камерах сгорания. - Труды ЦИАМ, № 355, 1992.
4. Дубовкин И. Ф. и др. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив. - Справочник. - М.: Химия, 1985.
5. Дитякин Ю. Ф. и др. Распыливание жидкостей. - М., Машиностроение, 1977.