

ВЛИЯНИЕ МЕЖФАЗОВОГО ОБМЕНА НА СМЕСЕОБРАЗОВАНИЕ В МОДУЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

© 2002 А. И. Майорова, А. А. Свириденков, В. В. Третьяков

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

Разработана математическая модель двухфазного потока применительно к камере сгорания ГТД, включающая обмен импульсами и теплотой между газом и каплями топлива. Выполнено расчетное исследование модельного течения в прямом канале прямоугольного поперечного сечения при струйной подаче с его стенки газожидкостной смеси. Установлено, что при смешении воздушных потоков различной плотности теплообмен между газом и каплями оказывает существенное влияние на температурные поля.

В настоящее время одной из актуальных проблем при расчете камер сгорания является проблема учета влияния капель на воздушный поток. Оценки показывают, что учет этого влияния в отдельных режимах может привести к существенному, почти двукратному, изменению дальности топливного факела, а следовательно, и к соответствующим изменениям в распределениях концентраций топливных фаз. При этом воздействие капель на газовый поток носит тройной характер: 1) капли, имея конечный объем, представляют собой некоторое «загромождение» газового потока; 2) между каплями и газовым потоком происходит обмен импульсами, что приводит к ускорению или замедлению тех и других; 3) между ними имеют место процессы теплообмена. Рассмотрению двух последних взаимодействий и посвящена настоящая работа.

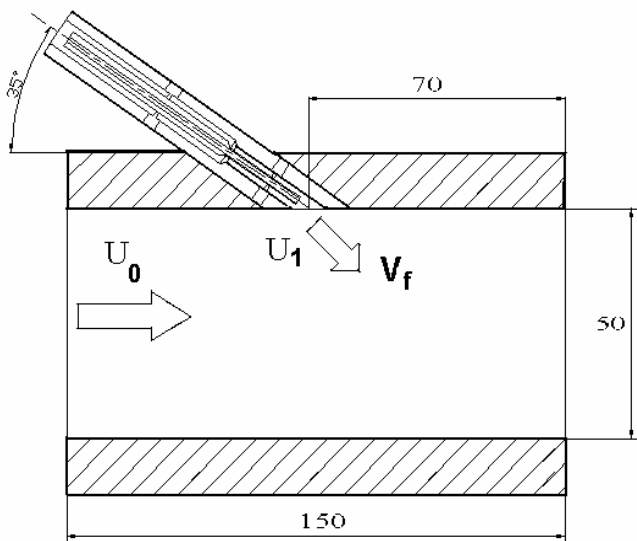


Рис. 1. Схема исследуемой модели

Исследуемая модель (рис. 1) представляет собой прямой канал прямоугольного поперечного сечения 50×30 мм² и длиной 150 мм, в который подается воздух со скоростью U_0 . Впрыск топлива внутрь канала со скоростью V_f осуществляется через отверстие в его верхней стенке с помощью струйной форсунки, установленной под углом 35° к продольной оси канала и расположенной на расстоянии 15 мм от его боковой стенки. Соосно с подачей топлива в канал со скоростью U_1 поступает распыливающий воздух. Такая конструкция представляет собой элемент модуля камеры сгорания авиационного двигателя. Проведенное в работе численное исследование состояло в нахождении распределений концентраций капельно-жидкого топлива и температур в рабочем объеме модели без и при наличии взаимодействия капель топлива с воздушным потоком. При моделировании этого взаимодействия в уравнения движения газа и уравнение переноса энтальпии были добавлены источникные члены, описывающие влияние капель на газовый поток. Эти члены найдены из законов сохранения импульса и энтальпии системы газ-капли и из предположения о том, что импульс и теплота, передаваемые газовому потоку от капель, изменяют значения компонент скорости и температуры газа в тех ячейках расчетной области, через которые рассматриваемая капля «пролетает».

На данном этапе вопросы межфазового обмена импульсами и теплом

рассматриваются по отдельности. Влияние капель на газовый поток моделируется введением дополнительных слагаемых в источниковые члены уравнений сохранения массы, импульса и энергии, которые записываются в следующей консервативной форме:

$$\operatorname{div}(\rho \cdot \vec{U} \cdot \varphi - \Gamma_\varphi \cdot \operatorname{grad}\varphi) = S_\varphi + S_\varphi^{\text{int}}. \quad (1)$$

Здесь \vec{U} – вектор осредненной скорости, φ – зависимая переменная, Γ_φ – коэффициент диффузионного переноса, ρ – плотность, S_φ – внутренний источниковый член, S_φ^{int} – межфазовый источниковый член, описывающий влияние капель на соответствующие характеристики течения.

Записанная в виде (1) система уравнений неразрывности ($\varphi \equiv 1$, $\Gamma_\varphi \equiv 0$, $S_\varphi \equiv 0$), движения ($\varphi = U_i$, $i = 1, 2, 3 \dots$) и сохранения полной энтальпии ($Sh \equiv 0$) решается конечно-разностным итерационным методом Simple [1]. При этом для нахождения коэффициентов диффузионного переноса используется гипотеза Буссинеска о линейной зависимости компонент тензора турбулентных напряжений от компонент тензора скоростей деформации среднего движения и два уравнения переноса характеристик турбулентности.

Принятая в данной работе методика расчета концентрации топлива основана на расчете движения отдельных капель [2]. При этом вначале решается задача о движении газа без учета влияния движения капель на поток, а затем на основе полученных полей скоростей и температур рассчитывается распределение жидкого топлива и вычисляются межфазовые источниковые члены. На втором этапе производится пересчет газодинамических и температурных полей с учетом межфазовых источников (в качестве начальных условий расчета используются результаты 1-го этапа). При необходимости процесс повторяется несколько раз. Критериями сходимости итерационного процесса считались: для течения газа – отсутствие изменений от итерации к итерации полей скоростей и температуры, а для капель – стабилизация по итера-

циям координаты максимального значения концентрации капель в выходном сечении модели в пределах одной ячейки конечно-разностной сетки.

На данном этапе моделирования пренебрежем испарением капель. Тогда межфазовый источниковый член в уравнении неразрывности будет равен нулю, а величины S_U^{int} ,

S_V^{int} и S_W^{int} , описывающие влияние капель на компоненты импульса газового потока, будут являться составляющими вектора

$$\vec{S}_d = \frac{\partial(\rho_g) \cdot \vec{U}_g}{\partial t_g},$$

где индексы d и g относятся к каплям и газу (воздуху), соответственно, а величина \vec{S}_d находится из уравнения сохранения импульса для системы газ-капля:

$$\Delta(m_d \cdot V_d) + \Delta(m_g \cdot U_g). \quad (2)$$

В этом выражении изменение скорости $\Delta \vec{V}_d$ берется из решения уравнения движения отдельной капли.

Аналогичным образом межфазовый источниковый член в уравнении для энтальпии,

$$S_h^{\text{int}} = \frac{\partial(\rho_g \cdot h_g)}{\partial t_g},$$

описывающий теплообмен между каплями и газовым потоком, определяется из уравнения сохранения полной энтальпии для системы газ-капля, которое имеет вид

$$\Delta(m_d \cdot h_d) + \Delta(m_g \cdot h_g) = 0. \quad (3)$$

Здесь величина Δh_d вычисляется по найденному из решения уравнения нагрева

$$\frac{dT_d}{dt}.$$

Численные расчеты выполнены при следующих основных параметрах газового потока и капель топлива. За характерный размер принята высота канала $H_0 = 50$ мм, к этой величине и отнесены все линейные размеры задачи. Профиль скорости газа (воздуха) на входе в модель принимался равномерным, величина скорости воздуха $U_0 = 80$ м/с считалась характерной скоростью. Профили характе-

ристик турбулентности во всех входных сечениях также считались равномерными; их безразмерные значения приняты равными: энергии турбулентности $k_t = 0,01$, турбулентной вязкости $\nu_t = 0,001$. Скорость топливных капель в сечении впрыска составляла $V_f = 6$ м/с ($\frac{V_f}{U_0} = v_{k.o} = 0,075$), при этом предполагалось,

что топливные капли, входящие в рабочий объем модели под тем же углом 35° к ее оси, что и распыливающий воздух, равномерно заполняют входное сечение впрыска. Считалось, что распределение капель по размерам подчиняется закону Розина-Раммлера с показателем $n = 3,0$, а распределения капель по углам – равномерные. Средне-заутеровский размер капель принят равным $D_{32} = 100$ мкм (среднемедианный $D_m = 120$ мкм) в соответствии с экспериментальными данными и расчетами по теории струйной форсунки [3]. При этом концентрация капель топлива в устье форсунки равнялась $C_o = 60$ кг/м³.

На рис. 2 представлены результаты расчетов распределения капель жидкого топлива в рабочем объеме модели в виде изолиний концентраций в продольном сечении канала. Изолинии концентраций для ядра струи соответствуют диапазону $C = (0,02 - 1,0)C_o$; для периферии – $C = (0 - 0,02)C_o$.

Расчеты, представленные на рис. 2, проведены при одинаковых температурах сносящего потока и распыливающего воздуха.

Рис. 2а относится к расчету без учета влияния капель на газовый поток, а рис. 2б – с учетом этого влияния. Из сопоставления этих рисунков видно, что учет влияния капель на газовый поток приводит в данном случае, с одной стороны, к расширению струи, а с другой – к смещению ее оси к верхней стенке.

Действительно, глубина проникновения h_c , рассчитанная по оси струи (линия максимумов в профилях концентраций), на расстоянии $x = 1,5$ от места ддува изменяется от 0,4 при отсутствии обмена импульсами до 0,3 при его наличии. Здесь и далее $x = X/H_o$, $h_c = \Delta Y/H_o$, X – расстояние вдоль оси канала от места впрыска, ΔY – расстояние от места впрыска по радиальной координате. Полученный результат полностью соответствует результатам экспериментов. На рис. 2б кривая 1 соответствует видимой границе топливного факела, полученной из обработки его фотографии методом градиентного анализа. Из представленного рисунка видно, что в сечении $x = 0,7$ величина h_c равна 0,2, что близко к экспериментально полученному значению $h_c = 0,18$. Таким образом, можно считать, что получено хорошее согласование результатов расчетов, проведенных по предложенной модели, с экспериментальными данными по форме и глубине проникновения факела распыла в сносящий воздушный поток.

На следующем этапе решалась задача о влиянии обмена теплотой между каплями и газовым потоком на распределение темпера-

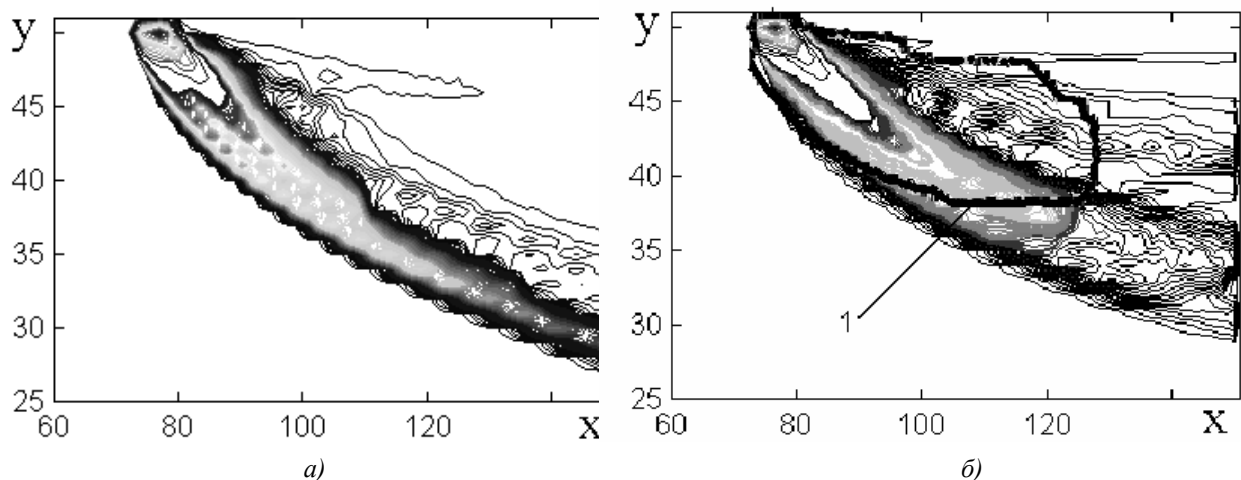


Рис. 2. Изолинии концентраций капель топлива в продольном сечении канала по центру струи: а) без учета влияния капель на газовый поток, б) с учетом влияния капель на газовый поток (обмен импульсами); кривая 1 – эксперимент

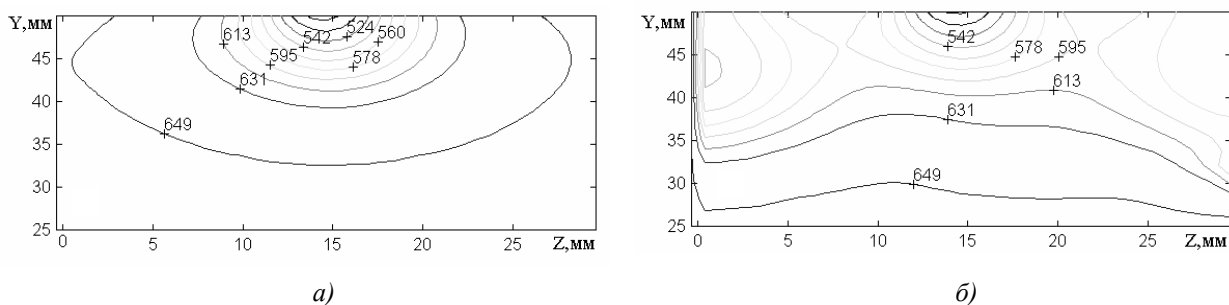


Рис. 3. Изолинии температуры газа в выходном поперечном сечении канала: а) без учета обмена теплотой, б) с учетом обмена теплотой

туры газа в рассматриваемой области. Межфазовый обмен импульсами не учитывался. При этом считалось, что на входе в модель газовый поток имеет температуру $T_o = 650$ К, а температура распыливающего воздуха и начальная температура капель равны $T_i = T_j = 293$ К. Рассчитанные температурные поля в выходном поперечном сечении модели приведены на рис. 2а и 2б для случаев отсутствия и наличия теплообмена, соответственно. Некоторая асимметрия температурных полей связана с известным эффектом отклонения струи к одной из стенок канала.

Из сравнения этих рисунков видно, что при смешении воздушных потоков различной плотности теплообмен между газом и каплями оказывает существенное влияние на температурные поля. Так, при отсутствии теплообмена между каплями и газом температурное влияние вдуваемой струи проявляется приблизительно на трети площади выходного сечения, в то время как при его наличии указанное влияние распространяется почти на половину этой площади. Поле температур, изображенное на последнем рисунке, показывает, что охлаждение основного воздушного потока происходит не только в более широкой области, но и имеет своеобразную периодическую вихревую структуру, которая соответствует образованию в поперечном сечении потока системы вихрей. Что касается

глубины проникновения топливного факела, то эта величина определяется главным образом отношением плотностей основного и распыливающего воздуха, что подтверждает приведенное на рис. 4 распределение концентраций топливных капель в продольном сечении модуля. Соответствующая величина в сечении $x = 2,2$ составляет $h_c = 0,21$.

Таким образом, из представленных данных видно, что теплообмен и обмен импульсами между воздушными потоками и каплями топлива существенно влияют на распределения температур и концентраций топливных капель, причем и в качественном, и в количественном плане.

Численные расчеты показали, что распространение газо-капельной струи в сносящем потоке сопровождается их расщеплением на систему струй (рис. 4). Похожее явление наблюдается и при распаде жидких струй при обтекании их газом.

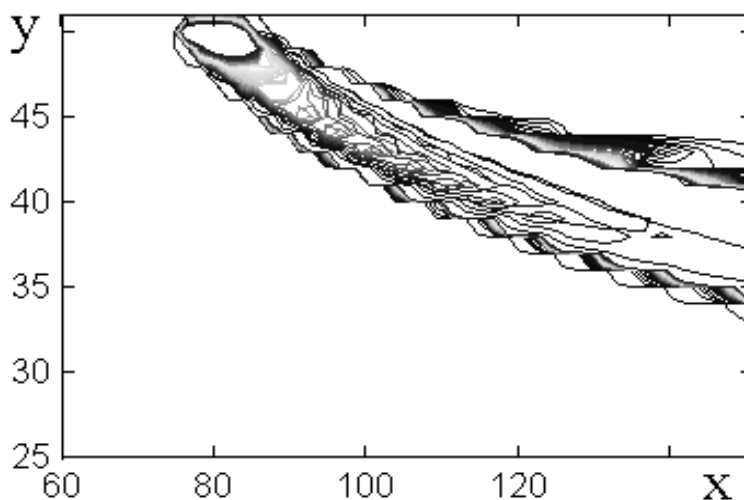


Рис. 4. Изолинии концентрации капель топлива в продольном сечении плоского канала по центру струи с учетом обмена теплотой

Список литературы

1. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. - 150 с.
2. Третьяков В. В. Расчеты концентраций распыленного топлива в камерах сгорания./

В сб. «Отрывные течения в камерах сгорания» под ред. В. И. Ягодкина . Труды ЦИАМ № 1203, 1987. С. 96-106.

3. Дитякин Ю. Ф., Клячко Л. А., Новиков Б. В., Ягодкин В. И. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение, 1977. - 208 с.

**INFLUENCE OF INTERPHASE EXCHANGE
ON FUEL-AIR MIXING IN A MODULE COMBUSTOR**

© 2002 A. I. Mayorova, A. A. Sviridenkov, V. V. Tretyakov

Central Institute of Aircraft Engine Construction named after P. I. Baranov, Moscow

A mathematical model of a two-phase flow in a gas turbine combustion chamber has been developed. The model includes momentum and heat exchange between the gas and fuel drops. Model flow in a straight channel of rectangular cross section with fuel aerosol injection from the wall has been calculated. Heat exchange between the gas and the drops is shown to have a strong influence on temperature fields when air flows of different densities are mixed.