

## ТЕПЛООБМЕН КАПЕЛЬНО-ЖИДКОГО ТОПЛИВА СО СНОСЯЩИМ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ В МОДУЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

### АННОТАЦИЯ

Предложены физические модели процессов межфазового тепло- и массообмена и основанные на них методики расчета. Численно решена задача о взаимодействии капле топлива со сносящим высокотемпературным воздушным потоком. Показано, что впрыск топлива струйной форсункой может вызвать существенное изменение температуры газа. При пневматическом распыле топлива холодной воздушной струей влияние межфазового обмена на характеристики основного потока незначительно.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из направлений разработки малоэмиссионных камер сгорания является использование так называемых модульных камер, в которых гомогенизация топливоздушной смеси достигается на стадии ее предварительной подготовки в специальных устройствах – модулях. В данной работе ставится задача расчета полей скорости и температуры воздуха, а также распределения капельно-жидкого топлива в рабочем объеме модуля с учетом процессов нагрева и испарения капель в тех режимах, типичных для камер сгорания, в которых существенно влияние капель на газовый поток.

Схема расчетной области приведена на рис. 1.

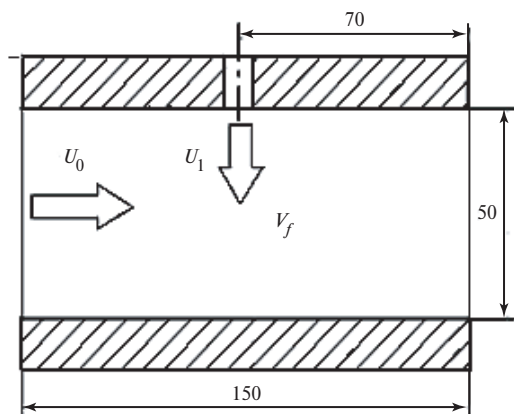


Рис. 1. Схема элемента модульной камеры сгорания (продольное сечение)

Влияние межфазового теплообмена на смешение в подобной модели ранее рассматривалось в [1]. Было показано, что расчетная методика хорошо описывает экспериментальные данные по конфигурации топливного факела. В настоящей работе в методику дополнительно включен учет массообмена между жидкой и газовой фазами. Цель работы состоит в выяснении двух вопросов: насколько велика область, в которой существенно охлаждение

основного воздушного потока каплями, и какова степень охлаждения этого потока. Кроме того, рассматривается вопрос о том, насколько получаемые результаты зависят от способа распыливания топлива: струйного или пневматического.

Выбранная для исследования модель представляет собой прямой канал прямоугольного поперечного сечения  $50 \times 30 \text{ мм}^2$  и длиной 150 мм, в который подается воздух со скоростью  $U_0$  и температурой  $T_0$ . Впрыск топлива с температурой  $T_f$  внутрь канала со скоростью  $V_f$  осуществляется через отверстие диаметром 2 мм в верхней стенке с помощью форсунки, установленной по нормали к продольной оси канала и расположенной посередине между боковыми стенками. При моделировании пневматической форсунки считается, что соосно с подачей топлива в канал поступает и распыливающий воздух со скоростью  $U_1$  и температурой  $T_1$ . При моделировании струйной форсунки считается, что распыливающий воздух отсутствует ( $U_1=0$ ). Расчеты проводились при следующих параметрах:  $U_0 = 20 \text{ м/с}$ ,  $T_0 = 900 \text{ К}$ ,  $T_f = 300 \text{ К}$ ,  $T_1 = 300 \text{ К}$ ,  $V_f = 8 \text{ м/с}$ . Давление газа на входе в канал составляло 100 кПа. Рассматривались варианты:  $U_1 = 0$  и 20 м/с. Диапазон суммарных коэффициентов избытка воздуха по каналу  $\alpha_k$  составлял от 1.35 до 5.4.

### 2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Расчеты течения газовой фазы основываются на численном интегрировании полной системы уравнений Рейнольдса и уравнения сохранения полной энтальпии, записанных в переменных Эйлера. Основной методикой учета влияния капель на газовый поток является предположение о том, что такой учет может быть сделан введением дополнительных слагаемых в источники членов уравнений сохранения массы, импульса и энергии. Подробности этой процедуры можно найти в обзоре [2]. Уравнения переноса записывались в следующей консервативной форме:

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

Здесь  $\vec{U}_g$  – вектор осредненной скорости газовой смеси,  $\varphi$  – зависимая переменная,  $\Gamma_\varphi$  – коэффициент диффузионного переноса,  $S_\varphi$  – внутренний источниковый член,  $S_\varphi^{\text{int}}$  – межфазовый источниковый член.

вый 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 ( $\varphi = U_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ) и сохранения полной энтальпии  $h$  ( $S_h \equiv 0$ ) решается конечно-разностным итерационным методом Simple [3]. Стенки считались теплоизолированными. Для нахождения коэффициентов турбулентной диффузии используются два уравнения модели турбулентности ( $k$ - $\varepsilon$ ) в модификации, учитывающей влияние низких чисел Рейнольдса турбулентности на турбулентные характеристики течения [4]. При этом на твердых стенках ставятся граничные условия прилипания. Плотность газа считается зависящей как от температуры, так и от давления и вычисляется из уравнения состояния идеального газа. В отсутствие химических реакций газовая смесь полагается состоящей из двух компонентов – паров керосина и воздуха. Для массовой доли паров керосина  $m_{fu}$  решается уравнение переноса типа (1), а массовая доля воздуха определяется из условия равенства единице суммы массовых долей всех компонентов.

Расчеты распределения топлива основаны на решении системы уравнений движения, нагрева и испарения отдельных капель, записанных в переменных Лагранжа [5]. Влияние турбулентных пульсаций на движение капель и изменение формы капель в процессе их движения считается пренебрежимо малым.

Межфазовые источниковые члены вычисляются при расчете распределения жидкого топлива из условий выполнения законов сохранения импульса, массы и теплоты системы «газ – капля».

Так как по своему физическому смыслу источниковый член в уравнении неразрывности  $S_1^{int}$  так же, как источниковый член в уравнении переноса  $m_{fu}$ ,  $S_{fu}^{int}$ , является приростом концентрации топливного пара в единицу времени, равным скорости испарения жидкости, то

$$S_1^{int} = S_{fu}^{int} = \dot{c}_v = -\frac{dc_f}{dt}, \quad (2)$$

где  $c_v$  – концентрация топливного пара (на единицу объема),  $c_f$  – концентрация жидкости,  $\dot{c}_v$  означает скорость изменения  $c_v$  за счет межфазового обмена.

Межфазовые источниковые члены в уравнениях сохранения компонент импульса  $S_{U_i}^{int}$  представляют собой компоненты вектора скорости изменения импульса газа за счет обмена с каплями в единице объема  $\bar{S}_g^{int}$ . Эти величины находятся из уравнения сохранения импульса для системы «газ–капля», которое имеет вид

$$\Delta(m_d \bar{V}_d) + \Delta(m_g \bar{U}_g) = 0, \quad (3)$$

где  $m_d$  – масса капли,  $m_g$  – масса выделенного элемента объема газа  $\Delta v$ , индексы « $g$ » и « $d$ » относятся

соответственно к газу и капле. Здесь и в дальнейшем считается, что объем топливных капель пренебрежимо мал по сравнению с объемом, занимаемым газом.

Считая  $\Delta t_d$  (время пребывания капли в элементе объема  $\Delta v$ ) достаточно малым, можно заменить второй член в выражении (3) на  $\bar{S}_g^{int} \Delta v \Delta t_d$ . При  $\Delta v \rightarrow 0$ ,  $\Delta t_d \rightarrow 0$  получим точное выражение для  $\bar{S}_g^{int}$  в дифференциальной форме:

$$\bar{S}_g^{int} = \sum_i (-c_{f,i} \frac{d\bar{V}_{d,i}}{dt} - \bar{V}_{d,i} \frac{dc_{f,i}}{dt}). \quad (4)$$

Здесь индекс « $i$ » относится к отдельной  $i$ -й капле, суммирование ведется по всем каплям, находящимся в единичном объеме,  $c_{f,i}$  означает долю  $i$ -й капли в объемной концентрации жидкости. Последний член в соотношении (4) описывает прирост импульса газа за счет импульса паровой топливной фазы.

Межфазовый источниковый член в уравнении для энтальпии  $\bar{S}_h^{int}$ , описывающий теплообмен между каплями и газовым потоком, определяется из уравнения сохранения полной энтальпии системы «газ–капля», которое имеет вид

$$\Delta(m_d h_d) + \Delta(m_g h_g) = -L \Delta m_g. \quad (5)$$

Здесь  $L$  – скрытая теплота испарения, а член в правой части равенства (5) определяет энергию, затрачиваемую на переход жидкости капли массы  $\Delta m_d = -\Delta m_g$  в газообразное состояние.

Используя определение энтальпии  $h_d = c_d T$ , где  $c_d$  – теплоемкость жидкой фазы, получим при  $\Delta v \rightarrow 0$ ,  $\Delta t_d \rightarrow 0$  (при условии, что масса капли изменяется только за счет испарения)

$$\bar{S}_h^{int} = \sum_i (L \frac{dc_{f,i}}{dt} - c_{f,i} (c_d \frac{dT_{d,i}}{dt} + T_{d,i} \frac{dc_{d,i}}{dt})). \quad (6)$$

Методика расчета двухфазного потока основана на решении сопряженной задачи течения и теплообмена газовой и жидкой сред. 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 считаются: для течения газа – отсутствие изменений от итерации к итерации полей скоростей и температуры, а для капель – стабилизация по итерациям координаты максимального значения концентрации капель в выходном сечении модели в пределах одной ячейки конечно-разностной сетки.

При моделировании распыла топлива полагалось, что топливный факел имеет полидисперсную структуру с распределением капель по размерам по закону Розина–Рамллера с показателем  $n = 3$  [6] и среднемедианным диаметром 50 мкм. Диапазон размеров капель разбивался на 14 интервалов. Распределение капель по углам принималось равномерным. Рабочей жидкостью считался керосин ТС-1.

На основе методических расчетов была выбрана конечно-разностная сетка, равномерная по направлениям  $x$  и  $z$ . Сетка по оси  $y$  сгущалась к стенкам канала по степенному закону с показателем 0,91. Общее число узлов сетки составляло  $111 \times 111 \times 41 = 505141$ . Предполагалось, что сносящий воздушный поток на входе имеет развитый турбулентный профиль, а распыливающий воздух – равномерный профиль

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Результаты расчета полей скоростей в окрестности места впрыска для струйного ( $U_1 = 0$ ) и пневматического ( $U_1 = 20$  м/с) распыла приведены соответственно на рис. 2 и 3. Здесь и в дальнейшем обезразмеривание проведено на характерный размер  $H_0 = 50$  мм – высоту канала и характерную скорость  $U_0 = 20$  м/с.

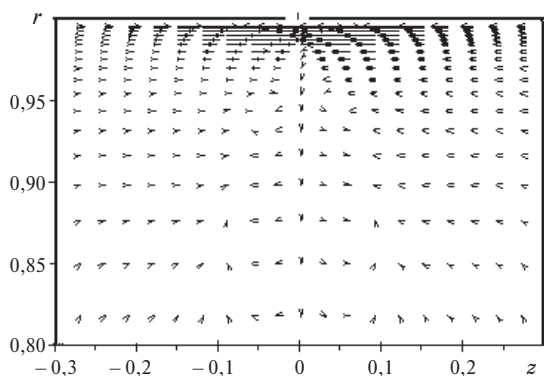


Рис. 2. Расчетное векторное поле скорости в поперечном сечении смесителя  $x = 0.28$  при струйной подаче топлива ( $U_1 = 0$ );  $\alpha_k = 1.35$

В отсутствие подачи топлива при  $U_1 = 0$  поток является однородным и изотермическим. При струйном распыле в результате взаимодействия капель с основным воздушным потоком по обе стороны от центра отверстия вдува наблюдаются индуцированные каплями зоны обратного тока (рис.2), увеличивающиеся с ростом расхода топлива. Вместе с тем сами значения скоростей вторичного течения почти на порядок меньше характерной скорости течения. При подаче распыливающего воздуха основную роль в формировании вторичных течений играет взаимодействие воздушных струй основного и распыливающего воздуха. За подающей струей образуется интенсивная трехмерная зона обратных токов. Влияние на структуру течения процесса взаимодействия капель с воздухом для рассматриваемых случаев практически незаметно.

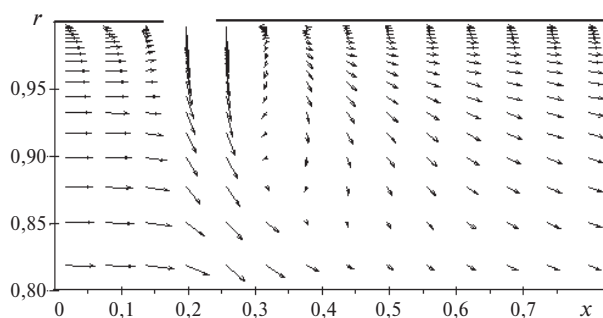


Рис. 3. Расчетное векторное поле скорости в центральном продольном сечении смесителя при пневматической подаче топлива ( $U_1 = 20$  м/с)

На рис. 4 и 5 представлены распределения безразмерных массовых концентраций капельно-жидкого топлива  $c_f$  в поперечном сечении смесителя. Обезразмеривание проведено на величину плотности основного воздушного потока на входе. Сравнительный анализ полей концентраций при струйном распыле для различных значений  $\alpha_k$  показал, что качественно картины распределений концентраций капель одинаковы. Это свидетельствует о незначительном влиянии капель на изменения скорости газа.

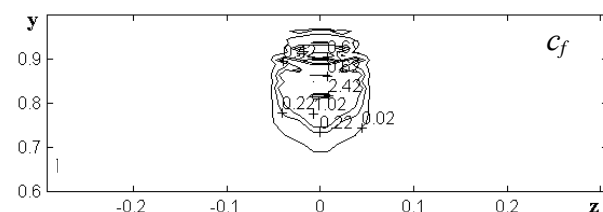


Рис. 4. Изолинии массовых концентраций топливных капель в поперечном сечении смесителя  $x = 0.28$  при струйной подаче топлива ( $U_1 = 0$ );  $\alpha_k = 1.35$

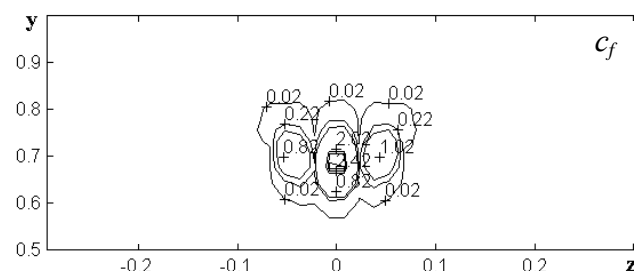


Рис. 5. Изолинии массовых концентраций топливных капель в поперечном сечении смесителя  $x = 0.28$  при пневматической подаче топлива ( $U_1 = 20$  м/с);  $\alpha_k = 1.35$

При подаче распыливающего воздуха картины распределений топлива существенно меняются. Однако и в этом случае влияние обмена импульсами между воздухом и каплями на распределения концентраций мало заметно. Расщепление топливной струи в поперечном направлении связано с возникновением интенсивных циркуляционных течений в следе за струей распыливающего воздуха. Отсутствие такого расщепления при струйном распыле сви-

детельствует о том, что индуцируемые каплями вторичные течения недостаточно интенсивны.

Таким образом, как при струйном, так и при пневматическом распыле можно пренебречь обменом импульсами между газом и каплями, а о взаимодействии каплей с воздушным потоком можно судить по температурным полям.

Проведенные расчеты показали, что даже при отсутствии подачи распыливающего воздуха температура газа существенно зависит от значений режимных параметров. Распределения температур воздуха в условиях отсутствия и наличия подачи распыливающего воздуха приведены на рис. 6–8.

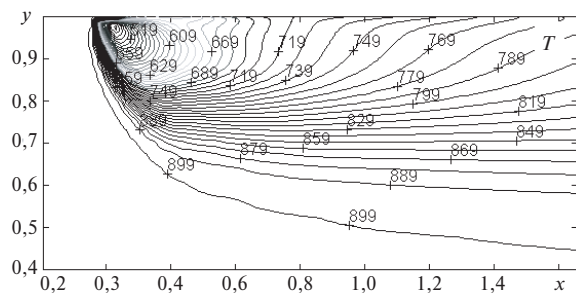


Рис. 6. Изолинии температур воздуха в продольном сечении смесителя при струйной подаче топлива ( $U_1 = 0$ );  $\alpha_k = 1.35$

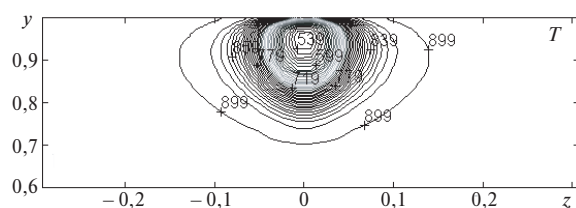


Рис. 7. Изолинии температур воздуха в поперечном сечении смесителя  $x = 0.28$  при струйной подаче топлива ( $U_1 = 0$ );  $\alpha_k = 1.35$

Рисунки 6 и 7 характеризуют непосредственное влияние теплообмена между газом и каплями на температурные поля, поскольку в отсутствие этого теплообмена воздух имеет одинаковую начальную температуру во всей области течения. Из распределений температур в поперечном сечении модели видно, что при  $\alpha_k = 1.35$  область теплообмена при  $x = 1.6$  простирается в направлении оси  $y$  на расстояние  $\Delta y = 0.55$ , при  $\alpha_k = 5.4$ , как показали расчеты, это расстояние равно  $\Delta y = 0.42$ . Соответствующие этим вариантам минимальные температуры равны 447 и 638 К.

Таким образом, при увеличении расхода топлива через струйную форсунку влияние каплей на температурные поля становится все более существенным. При вдуве холодного распыливающего воздуха, когда теплообмен в основном определяется взаимодействием основного и распыливающего потоков, этот эффект, как показывают расчеты, практически незаметен.

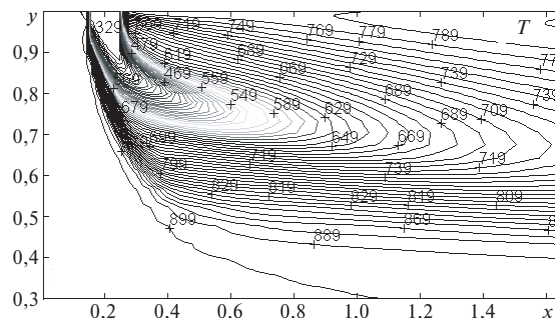


Рис. 8. Изолинии температур воздуха в продольном сечении смесителя при пневматической подаче топлива ( $U_1 = 20$  м/с);  $\alpha_k = 1.35$

Итак, показано, что впрыск топлива струйной форсункой может вызвать существенное изменение температуры газа. В данном случае оно происходит за счет передачи тепла от газа к каплям и идет на их нагрев и испарение. При пневматическом распыле топлива влияние межфазового обмена незначительно. Однако оно может быть более существенным при вдуве горячего распыливающего воздуха, когда теплообмен внутри газового потока менее интенсивен.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 05-08-17942.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $x, y, z$  – декартовы координаты;
- $\vec{U}_g$  – вектор осредненной скорости газа, м/с;
- $\vec{V}_d$  – скорость капли, м/с;
- $c_f$  – объемная концентрация жидкости, кг/м<sup>3</sup>;
- $\rho$  – плотность газовой смеси, кг/м<sup>3</sup>;
- $T$  – температура, К;
- $\alpha_k$  – суммарный коэффициент избытка воздуха.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майорова А.И., Свириденков А.А., Третьяков В.В. Влияние межфазового обмена на смесеобразование в модульной камере сгорания // Вестник СГАУ. 2002. №2. С.71–75.
2. Лебедев А.Б., Третьяков В.В. Методы расчета распределения топлива в камерах сгорания. ЦИАМ Обзор № 355. М.: Изд-во ЦИАМ, 1992. 138 с.
3. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
4. Chien K.J. Predictions of Channel and Boundary-Layer Flows with Low-Reynolds-Number Turbulence Mode// AIAA Journal. 1982. V. 20. P. 33–38.
5. Третьяков В.В. Расчеты концентраций распыленного топлива в камерах сгорания // Отрывные течения в камерах сгорания / Под ред. В.И. Ягодкина (Труды ЦИАМ №1203). 1987. С.96–106.
6. Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А., Новиков Б.В., Ягодкин В.И. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение, 1977. 208 с.