

УДК 621.438

РАЗРАБОТКА ОБОБЩЁННОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА МЕЖДУ ТОПЛИВНЫМИ КАПЛЯМИ И ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КАМЕРАМ СГОРАНИЯ ГТД

© 2013 В. В. Третьяков, А. А. Свириденков

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

Представлена обобщённая модель нагрева и испарения отдельных топливных капель, учитывающая влияние на процесс испарения распределения концентраций топливных паров в окружающем каплю пространстве. Проведены численные расчёты для режимов, характерных для камер сгорания ГТД. Определён диапазон температур воздушного потока, в котором влияние концентрации топливных паров в окружающем каплю пространстве на скорость ее испарения и распределение топлива в рабочем объеме камеры сгорания является существенным.

Камера сгорания, испарение капель, смешение, теплообмен.

Введение

В работах [1, 2] для расчётов распределений топлива в элементах камер сгорания использованы модели, в которых не учитывается зависимость скорости испарения капель от распределений в потоке паровой топливной фазы. Вместе с тем, как показано, например, в работах Волынского М.С., Лефевра А.Н., Сполдинга Д.Б. и др. [3 – 6], такой учёт очень важен. Особенно это касается следующих трёх аспектов. Первый – учёт зависимости скорости испарения капель от давления насыщающих паров на её поверхности. Второй – зависимость скорости испарения капель от характеристик топливоздуш- ной смеси, окружающей каплю. И третий – учёт в модели испарения капель нестационарного характера теплообмена на начальном этапе их прогрева, связанный с различием равновесной температуры рассматриваемой капли от её температуры кипения. Целью проводимого в данном разделе исследования является выяснение вопроса о необходимости учёта в используемых при расчётах смесеобразования в камерах сгорания ГТД методиках вышеупомянутых трёх аспектов, а также дальнейшего совершенствования используемых моделей.

Как и ранее, в данном исследовании будут приняты следующие упрощающие предположения.

1. Предполагается, что капля имеет сферическую форму, а изменение этой формы вдоль траектории может быть учтено введением в выражение для коэффициента сопротивления капли специального множителя, зависящего от числа Вебера.

2. Предполагается локальный стационарный характер течения газа вблизи капли и пренебрегается влияние на движение капель турбулентных пульсаций скорости воздушного потока.

3. Считается, что процесс прогрева капли происходит мгновенно, т.е. температура капли равна температуре её поверхности.

4. Не учитывается турбулентная диффузия капель.

5. Предполагается, что локально процесс тепло- и массообмена между газовым потоком и каплей описывается законами стационарного испарения, а влияние на эти процессы движения капли относительно газовой среды может быть учтено введением специального экспериментального множителя в выражение для числа Нуссельта.

6. Зависимости коэффициентов, характеризующих газовую фазу и капли от температуры, приняты линейными.

7. Давление насыщающих паров вблизи поверхности капли зависит только от температуры её поверхности и может быть рассчитано по уравнениям Ван-дер-Ваальса.

8. При моделировании процессов тепло- и массообмена число Льюиса принимается равным 1.

Описание модели

Принятая в данной работе модель расчёта основана на уравнениях движения, нагрева и испарения отдельных капель. Движение отдельной капли жидкости в известном газодинамическом поле описывается обыкновенным дифференциальным уравнением вида

$$m \frac{d\dot{V}}{dt} = \mathbf{R}, \quad (1)$$

где m – масса капли; \dot{V} – её скорость; \mathbf{R} – сила аэродинамического сопротивления: $\mathbf{R} = 0,5KC_dS r_r \dot{W}$; $\dot{W} = \dot{V} - \dot{U}$ – скорость капли относительно газа; \dot{V} – абсолютная скорость капли; \dot{U} – скорость воздушного потока; C_d – коэффициент сопротивления капли; S – площадь ее миделевого сечения; ρ_g – плотность газа.

Считается, что закон сопротивления капли аналогичен закону сопротивления твёрдых частиц сферической формы: $C_d = 24/Re + 4,4/Re^{0,5} + 0,32$, а коэффициент K учитывает изменение формы капли в процессе её движения и вычисляется согласно [3] в зависимости от числа Вебера We следующим образом: $K = \exp(0,03We^{1,5})$, что является обобщением экспериментальных данных.

В вышеприведённых соотношениях: $Re = \rho_r DW / \eta_r$; $We = \rho_r DW^2 / \sigma$; Re – число Рейнольдса капли; We – число Вебера; S – площадь миделевого сечения капли диаметра D ; η_r – коэффициент динамической вязкости газа; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости капли.

Уравнение испарения капли получается приравниванием тепловых потоков

через сферическую поверхность радиуса r и поверхность капли радиуса r_k . Считается, что скорость испарения капли определяется диффузией топливных паров от её поверхности. Согласно [4], при числе Льюиса $Lw=1$, т.е. при $\rho_g D_g = \lambda_g / Cp_g$, уравнение испарения капли имеет следующий вид:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{4I_r}{Dr_k Cp_g} \ln(1 + Bm). \quad (2)$$

Здесь ρ_r – плотность газа; ρ_k – плотность жидкости капли; D_r – коэффициент диффузии газа; λ_r – коэффициент теплопроводности газа; Cp_r – коэффициент удельной теплоемкости при постоянном давлении; Bm – коэффициент массообмена, который рассчитывается по формуле (см., например, [5]):

$$Bm = \frac{Y_{n,k}}{(1 - Y_{n,k})}; \quad (3)$$

$$Y_{n,k} = \frac{1}{[1 + (\frac{p}{p_H} - 1) \frac{m_r}{m_T}]}. \quad (4)$$

В приведённых формулах Y_n – массовая доля топливных паров в окружающем каплю пространстве; $Y_{n,k}$ – массовая доля топливных паров у поверхности капли; p – давление в окружающей среде; p_H – давление насыщающих паров у поверхности капли; m_r – молекулярный вес окружающей каплю смеси паров топлива и воздуха (газа); m_T – молекулярный вес топлива.

Для вычисления давления насыщающих паров воспользуемся уравнением Ван-дер-Ваальса вида [4]:

$$p_H = \exp(A - B/(T_d - 43)). \quad (5)$$

Здесь A и B – постоянные Ван-дер-Ваальса; T_d – температура капли.

Заметим, что если давление насыщающих паров у поверхности капли p_H равно давлению газа в окружающей среде

p , то $T_d = T_v$, где T_v – температура испарения капли:

$$T_v = 43 + \frac{B}{A - \ln p}. \quad (6)$$

Отметим, что соотношение (2) описывает процесс стационарного испарения капли. Для учёта влияния на этот процесс движения капли правая часть уравнения (2) умножается на величину $(1+0,3Pr^{1/2}Re^{1/3})$, которая представляет собой поправку, обобщающую многочисленные экспериментальные данные. Таким образом, получаем

$$\frac{dD}{dt} = (1+0,3Pr^{1/2}Re^{1/3}) \frac{4I_{\Gamma}}{Dr_{\kappa}Cp_{\Gamma}} \ln(1+Bm), \quad (7)$$

где Pr – число Прандтля: $Pr = \eta_{\Gamma} \rho_{\Gamma} Cp_{\Gamma} / \lambda_{\Gamma}$.

В вышеприведённых соотношениях величины, характеризующие газ (нижний индекс «Г»), который представляет собой смесь воздуха и топливных паров, вычисляются согласно [3, 4] следующим образом:

$$\begin{aligned} r_{\Gamma} &= m_{\Gamma} \frac{p}{RT}; \\ m_{\Gamma} &= \frac{m_B m_{\Pi} (1 + Y_{\Pi})}{Y_{\Pi} m_B + m_{\Pi}}; \\ Cp_{\Gamma} &= Cp_{\Pi} Y_{\Pi} + Cp_B (1 - Y_{\Pi}); \\ \lambda_{\Gamma} &= \lambda_{\Pi} Y_{\Pi} + \lambda_B (1 - Y_{\Pi}); \\ \eta_{\Gamma} &= \eta_{\Pi} Y_{\Pi} + \eta_B (1 - Y_{\Pi}). \end{aligned} \quad (8)$$

В формулах системы (8) выражена зависимость скорости испарения капли от концентрации топливного пара в окружающем пространстве; здесь нижний индекс «В» означает воздух, «П» – парообразное топливо.

Уравнение, описывающее нагрев капли, получается из решения задачи о сохранении потока тепла через поверхность капли. Тепловой поток, падающий на каплю, равен сумме тепловых потоков, связанных с нагревом капли и ее испарением [4]. Таким образом, имеет место следующее уравнение:

$$m_{\kappa} C_T \frac{dT_d}{dt} = [pD^2 \alpha (T_{\Gamma} - T_d) + L \frac{dm_{\kappa}}{dt}]$$

или

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{1}{m_{\kappa} C_T} [pD^2 \alpha (T_{\Gamma} - T_d) + \frac{dm_{\kappa}}{dt} L]. \quad (9)$$

Здесь $m_{\kappa} = pD^3 r_{\kappa} / 6$ – масса капли; L – удельная теплота испарения; T_d – температура капли; T_{Γ} – температура окружающей среды; C_T – удельная теплоёмкость каплеобразного топлива; α – коэффициент теплообмена капли с окружающей средой;

$\frac{dm_{\kappa}}{dt} = \frac{pD^2 r_{\kappa}}{2} \frac{dD}{dt}$, где $\frac{dD}{dt}$ берётся из решения уравнения (2).

Коэффициент теплообмена капли α , согласно [4], выражается следующей формулой:

$$\alpha = \lambda_{\Gamma} \cdot NU = \rho_{\Gamma} Cp_{\Gamma} \quad \text{и, так как}$$

$\frac{dm_{\kappa}}{dt} = 2pDr_{\Gamma} D_{\Pi} \ln(1+Bm)$, то, вводя коэффициент теплообмена $Bt = Cp(T_{\Gamma} - T_d)/L$, формула (9) преобразуется в следующую:

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{12I_{\Gamma} L}{D^2 r_{\kappa} C_T Cp_{\Gamma}} \ln(1+Bm) \left(\frac{Bt}{Bm} - 1 \right). \quad (10)$$

Отметим, что нагрев капли происходит до тех пор, пока температура капли не достигает её равновесного значения T_e такого, что всё тепло, поглощаемое каплей, идёт на её испарение и передаётся каплям топливным парам. Такая ситуация соответствует равенству нулю выражения, стоящего в квадратных скобках формулы (9), или равенству коэффициентов тепло- и массообмена: $Bt = Bm$:

$$T_e = T_{\Gamma} - LBm/Cp_{\Gamma}. \quad (11)$$

Учёт влияния движения капли относительно газа на нагрев капли производится аналогично предыдущему введению в формулу (11) экспериментального множителя $(1+0,3Pr^{1/2}Re^{1/3})$. Отметим, что

в работах [1, 2] расчёт распределений топлива в камерах сгорания проводился с использованием условия равенства коэффициентов тепло- и массообмена: $Bt = Bm$.

Таким образом, влияние топливных паров на скорость испарения капель проявляется через зависимость коэффициента массообмена Bm от массовых долей концентрации топливных паров в окружающем пространстве и у поверхности капли $Y_{п}$ и $Y_{п,к}$, а также через зависимости (8) характеристик газовой среды от распределения концентраций топливных паров в окружающем каплю пространстве. Отметим также, что приведённые соотношения справедливы лишь при числе Льюиса $Lw=1$. В более общем случае необходимо использовать формулы, приведённые в работе [3]. В целом методика численных расчётов распределения топлива с учётом влияния на скорость испарения капель распределения в потоке топливных паров описана в обзоре [6]. Некоторые отличия в приведённых формулах от формул работы [6] связаны с более корректным моделированием процесса испарения и прогресса капли.

Результаты расчётов

Ниже приводятся результаты расчёта, выполненного для жаровой трубы камеры сгорания с двухъярусным завихрителем с установленной на её оси форсункой. Расчёты течения и распределения топлива проведены по методике работы [1]. При моделировании распыла топлива полагалось, что распределение капель по размерам подчиняется закону Розина-Раммлера с показателем $n = 3$, а распределение капель в окружном (по углу j) и продольном (по углу ψ) направлениях – нормальному закону. Начальные скорости капель задавались модулем скорости V_0 и значениями продольного и окружного углов их вылета из распыливающего устройства.

В результате решения находятся поля скорости газового потока, траектории

капель в этом потоке, изменение параметров этих капель вдоль их траекторий и поля концентраций капельно-жидкой топливной фазы C_k и скорости парообразования $\partial C_v / \partial t = c_t$ в рабочем объёме камеры. После этого производится коррекция температуры капли и скорости её испарения по вышеприведённым соотношениям и делается следующий итерационный шаг. При корректировке параметры газовой смеси рассчитываются с учётом зависимости коэффициентов переноса и свойств среды от её температуры в соответствии с соотношениями [7] для топливовоздушной смеси. Топливо – керосин TS1.

На рис.1 приведено распределение скоростей в продольном сечении жаровой трубы, а на рис.2 – соответствующие распределения концентраций капельно-жидкого и парообразного топлива для режима работы камеры $P_k=12$ атм, $T_k=800$ К. Температура впрыскиваемого топлива $T_{ж}=300$ К.

Расчёты в режиме $P_k=12$ атм, $T_k=800$ К также показали, что влиянием топливных паров на испарение капель в данном случае можно пренебречь. Это связано с тем, что при высоких значениях температуры T_k равновесная температура капли T_e приблизительно равна температуре окружающего каплю газа T_g . Поэтому в первом приближении вычитаемым в уравнении (11) можно пренебречь. По существу, это обстоятельство и использовано при проведении расчётов в работе [2].

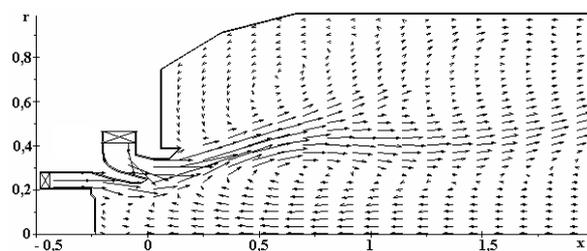


Рис.1. Распределение скоростей в продольном сечении камеры

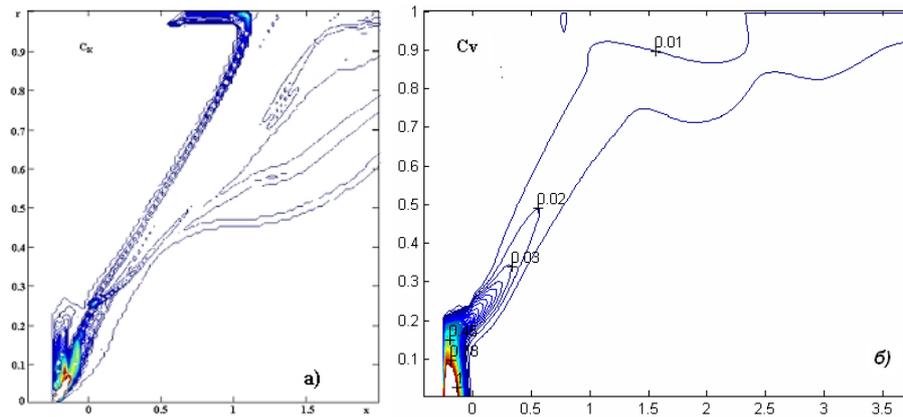


Рис.2. Распределения концентраций капельножидкого (а) и парообразного (б) топлива в продольном сечении камеры

Результаты расчётов для режимов с меньшими значениями температуры и давления воздуха на входе в камеру приведены на рис.3 – 5.

На рис.3 представлены распределения концентраций капельно-жидкого топлива для режима $P_k = 5$ ата, $T_k = 400$ К (P_k и T_k – давление и температура в камере). Температура впрыскиваемого топлива $T_{ж} = 300$ К. Рис.3, а соответствует случаю

равновесного испарения капель, рис.3, б – неравновесному.

Здесь и далее под моделью равновесного испарения понимается двухступенчатая модель, согласно которой вначале происходит нагревание капли до равновесной температуры T_e без её испарения, а затем испарение капли при постоянной температуре $T_d = T_e$. [2].

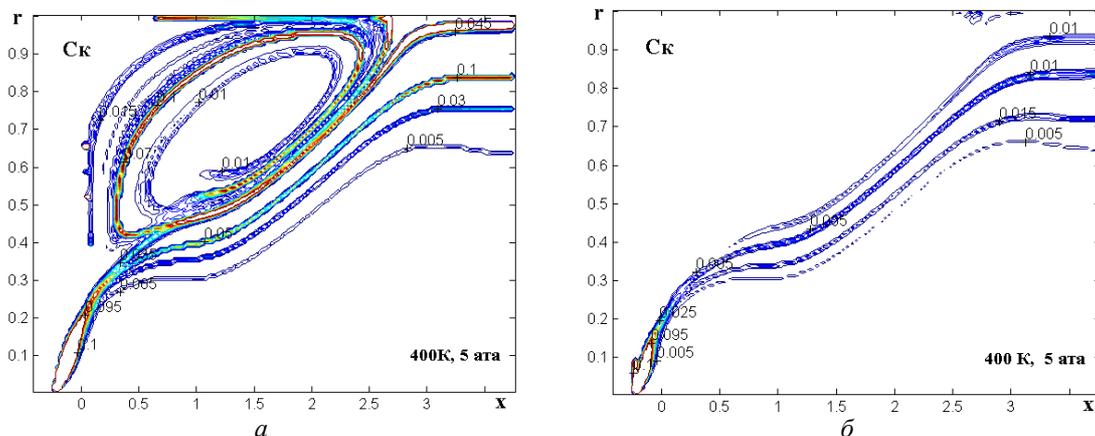


Рис.3. Поле концентраций топлива в продольном сечении камеры. $T_k = 400$ К, $P_k = 5$ ата.

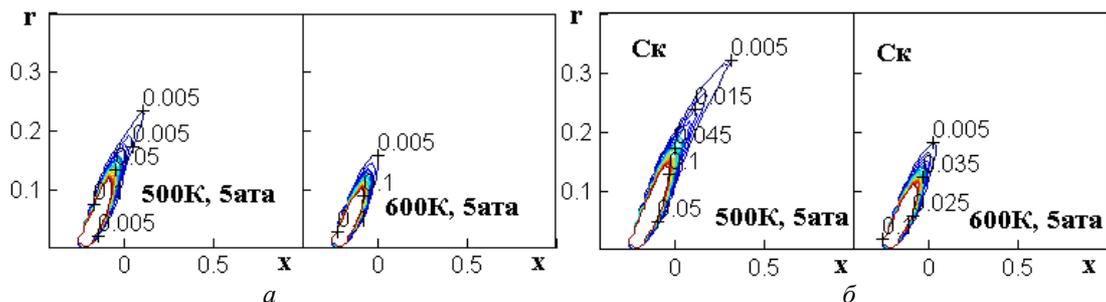


Рис.4. Распределение концентраций капельно-жидкого топлива в продольном сечении камеры: $P_k = 5$ ата, $T_k = 500$ и 600 К

Из приведённых рисунков видно, что при температуре $T_k = 400$ К и давлении $P_k = 5$ ата распределения топлива, полученные с учётом неравновесности испарения, качественно отличаются от полученных по модели равновесного испарения. Аналогичные результаты имеют место и при давлениях в камере $P_k = 1-15$ ата. С повышением температуры в камере влияние неравновесности испарения сглаживается. Так, при $T_k = 500$ К имеются лишь количественные различия в распределениях концентраций. При $T_k = 600$ К и выше равновесные и неравновесные распределения практически неразличимы, что иллюстрируется рис. 4. Рис.4, а соответствует равновесному испарению, рис.4, б – неравновесному.

Выводы

Разработана обобщённая модель испарения топливных капель, учитывающая влияние на скорость их испарения концентрации топливных паров в окружающем каплю пространстве. В этой модели процессы тепло- и массообмена между газовым потоком и каплей описываются с помощью модифицированного числа Нуссельта Nu , которое зависит от концентраций пара в набегающем потоке и у поверхности капли и давления насыщающих паров вблизи капли, а влияние на эти процессы движения капли относительно газовой среды учитывается введением добавочного множителя традиционного вида в выражении для числа Nu .

По разработанной модели выполнены расчёты распределения концентраций капельно-жидкого и парообразного топлива в жаровой трубе камеры сгорания на типичных режимах работы ГТД. Показано, что влияние концентрации топливных паров в окружающем каплю пространстве на скорость её испарения и, как следствие, на распределение топлива в рабочем объёме камеры сгорания весьма существенно при температурах воздуха $T_k = 500$ К и

ниже. При более высоких температурах этим влиянием можно пренебречь.

Для окончательного вывода о необходимости совершенствования разработанной модели для расчётов в камерах сгорания ГТД нужна её экспериментальная верификация и проведение аналогичных расчётов при числах Льюиса, отличных от 1.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований. Проект № 11-01-00352.

Библиографический список

1. Третьяков, В.В. Расчет распределений топлива во фронтном устройстве камеры сгорания с трехъярусным завихрителем [Текст] / В.В. Третьяков // Изв. вуз. Авиационная техника, №4. – Казань, 2007. – С.34–38.
2. Boysan, F. Three-dimensional Model of Spray Combustion in Gas Turbine Combustors [Text] / F. Boysan, [et all] AIAA-81-0324.
3. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей [Текст] / [Б.В. Раушенбах и др.] / – М.: Машиностроение, 1964. – 526 с.
4. Lefebvre, A.N. “Atomization and Sprays”. Combustion: An International Series. 1989. Hemisphere Publishing Corporation. USA.
5. Сполдинг, Д.Б. Горение и массообмен [Текст] / Д.Б. Сполдинг / – М.: Машиностроение, 1985. – 237 с.
6. Лебедев, А.Б. Методы расчета распределений топлива в камерах сгорания [Текст] / А.Б. Лебедев, В.В. Третьяков // Обзор № 355. – ЦИАМ. – 1992. – 138 с.
7. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив. [Текст]: справочник / [И.Ф. Дубовкин и др.]. – М.: Химия, 1985. – 240 с.

DEVELOPMENT OF A GENERALIZED MODEL OF HEAT-MASS TRANSFER BETWEEN FUEL DROPS AND GAS STREAM WITH REFERENCE TO GAS TURBINE ENGINE COMBUSTION CHAMBERS

© 2013 V. V. Tretyakov, A. A. Sviridenkov

Central Institute of Aviation Motors (Moscow)

The paper presents a generalized model of heating and evaporation of separate fuel drops, taking into account the influence of the distribution of fuel steam concentration around the drop on the evaporation process. Numerical calculations for the operations typical for gas turbine engine combustion chambers are presented. The range of air flow temperatures over which the influence of fuel steam concentration in the drop environment on the rate of its evaporation and the fuel distribution in the swept volume of the combustion chamber is significant has been defined.

Combustion chamber, drop evaporation, mixing, heat exchange.

Информация об авторах

Третьяков Валентин Валентинович, кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ФГУП ЦИАМ). E-mail: tretjak@ciam.ru. Область научных интересов: расчетно-теоретические методы исследования гидродинамики, распыливания топлива, смесеобразования и процессов тепло- и массообмена.

Свириденков Александр Алексеевич, ведущий инженер, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ФГУП ЦИАМ). E-mail: sviriden@ciam.ru. Область научных интересов: экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования гидродинамики, распыливания топлива, смесеобразования и процессов тепло- и массообмена.

Tretyakov Valentin Valentinovich, candidate of physics and mathematics, associate professor, leading researcher, Central Institute of Aviation Motors. E-mail: tretjak@ciam.ru. Area of research: computational and theoretical research methods of investigating hydrodynamics, fuel atomization, mixing and heat-mass transfer processes.

Sviridenkov Alexander Alekseevich, leading engineer, Central Institute of Aviation Motors. E-mail: sviriden@ciam.ru. Area of research: experimental, computational and theoretical research methods of investigating hydrodynamics, fuel atomization, mixing and heat-mass transfer processes.