

Представленные результаты используются при проектировании МКС вновь разрабатываемых или модернизируемых ГТУ.

УДК 621.45.022.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВАНИЯ И ИСПАРЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ КАПЕЛЬ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКАХ

Третьяков В.В.

ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г. Москва, tretjak@ciam.ru

Из баланса массовых потоков топливного пара через поверхность капли радиуса r_k и равенства тепловых потоков через поверхность капли и сферическую поверхность радиуса r получаются следующие уравнения для определения скорости испарения капли и изменения её температуры по времени:

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{4\pi \cdot r_k \lambda}{C_p} \ln \left[1 + \frac{C_p(T - T_d)}{L_{\Pi} + \frac{Q_H}{dm/dt}} \right]; \quad (1)$$

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{1}{C_{km}} \left[4\pi \cdot r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{dm}{dt} L_{\Pi} \right]. \quad (2)$$

Здесь m – масса капли, T_d – ее температура, T – температура газа в окружающем пространстве, C_p – коэффициент удельной теплоемкости газа при постоянном давлении, λ – коэффициент теплопроводности газа, L_{Π} – скрытая теплота испарения, Q_H – тепловой поток, идущий на нагрев капли, C_k – удельная теплоемкость жидкости капли.

Для получения рабочих формул расчета температуры и массы капель из соотношений (1) и (2) обычно делается ряд упрощающих предположений. Так, при преобразовании уравнения (2) его интегрирование по радиусу r от r_k до ∞ и по температуре - от T_d до T проводится в предположении о постоянстве параметров, описывающих процесс испарения капель, т.е. пренебрегается зависимостями соответствующих величин от температуры. В результате получается следующая приближенная формула:

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{1}{C_{km}} \left[4\pi \cdot r_k \lambda (T - T_d) - \frac{dm}{dt} L_{\Pi} \right]. \quad (3)$$

Используются и другие упрощающие предположения, которые связаны, как правило, со следующими основными аспектами: в уравнении теплового баланса во время нагрева капли пренебрегается теплом, идущим на ее испарение, и предполагается равенство коэффициентов тепло- и массообмена, что соответствует равенству единице числа Льюиса: $\rho D_{\Pi} = \lambda / C_p$. Это число

определяется как $\kappa = D_{\text{П}} \rho C_p / \lambda$, где ρ , C_p и λ – плотность, коэффициент удельной теплоемкости при постоянном давлении и коэффициент теплопроводности газовой смеси (воздуха и пара), $D_{\text{П}}$ – коэффициент диффузии пара. В получающейся после преобразований системе уравнения испарения и нагревания капель могут быть проинтегрированы по отдельности.

Данная работа является продолжением исследований [1] - [3]. В работе [1] для расчета нестационарных течений и распределений топлива в камере сгорания ГТД использована обобщенная модель теплообмена при числе Льюиса, равном единице. Отметим, что равенство единице числа Льюиса отвечает классической теории явлений переноса в идеальных газах. Вместе с тем, эксперименты указывают на отличие этого параметра от единицы. Исследование, аналогичное [1], проведено в работе [2], которая посвящена исследованию влияния на нагревание и испарение капель наличия в окружающем пространстве топливных паров. В этой работе приведены также соотношения, описывающие характеристики нагревания и испарения отдельных топливных капель при числах Льюиса, не равных единице. Полученные в [2] формулы представляют собой дальнейшее развитие концепций работы [3].

Целью данного исследования является установление степени влияния сделанных в работах [2] и [3] допущений на результаты расчетов характеристик топливных факелов. При этом число Льюиса κ считается независимым варьируемым параметром, отличным от единицы.

Для выполнения поставленной задачи в данном исследовании рассматривается течение в следе за газодинамическим стабилизатором. При этом расчеты течения воздуха, конфигурации вытекающих в воздушный поток жидких струй и характеристики их распада проводятся по методике [4]. Согласно этой методике вначале рассчитываются распределения концентраций капельножидкого S_k и парообразного S_p топлива, а также скорости испарения капель dS_k/dt в мгновенных полях скоростей газового потока, а искомые распределения концентраций получаются в результате осреднения полученных соответствующих «мгновенных» полей. На данном этапе для простоты в использованных моделях пренебрегается влиянием на распределения концентраций топлива давления насыщающих паров у поверхности капли.

В качестве практического результата проведенного исследования в работе рассматриваются две различные модели нагревания капель. Согласно первой модели считается, что происходит «мгновенный» прогрев всей капли, то есть температура капли в любой момент времени равна температуре её поверхности. Во второй модели предполагается, что внешний тепловой поток прогревает лишь некоторый слой капли вблизи её поверхности. Считается, что тепловой поток, идущий на нагрев капли,

$$Q_H = C_{ж} m d T_S / dt, \quad (4)$$

где m – масса прогреваемого слоя капли, T_S – температура поверхности капли, α – коэффициент теплообмена капли с окружающей средой:

$$Q_H = 4\pi r_k^2 \alpha (T - T_d). \quad (5)$$

По описанной методике проведены расчеты характеристик факелов распыливания и распределений капельножидкого и парообразного топлива в следе за газодинамическим стабилизатором при различных температурах окружающего воздуха. Получены зависимости структур топливных факелов при температурах окружающего воздуха в диапазоне $300 \div 2000$ К. Показано, что на распределение топлива в рабочем объеме и горение топливовоздушной смеси существенное влияние оказывает нестационарный характер воздушного потока, поступающего из завихрителя. Проведены также предварительные опыты по зажиганию топливовоздушной смеси, стабилизации пламени и устойчивости процесса горения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Проект № 17-01-00213.

Список литературы

1. Погребная Т.В. Свириденков А.А., Третьяков В.В. Моделирование процессов тепло- и массо-обмена между воздушным потоком и топливными каплями в нестационарных течениях // Модели и методы аэродинамики: материалы Восемнадцатой международной школы-семинара. – М.: ЦАГИ, 2018. - С.117-118.
2. Sviridenkov A.A., Toktaliev P.D. and Tretyakov V.V. Numerical simulation of heat and mass transfer, mixture formation in combustion chamber of gas turbine engine // *Mathematica Montisnigri*. Vol.XL (2017). Mathematical modeling. P. 127 – 139.
3. Раушенбах Б.В. и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М: Машиностроение, 1964. - 526 с.
4. Третьяков В.В., Свириденков А.А., Токталиев П.Д. Распыливание топлива и смесеобразование в нестационарных закрученных течениях за газодинамическим стабилизатором // *Известия вузов. Авиационная техника*, 2017. - №3. - С.106-112.