

УДК 378.046: 621.4: 662

## **Моделирование процессов тепло- и массообмена биотоплив в трубопроводах авиационных теплообменников**

Л.С. Яновский, В.А. Казаков, В.В. Павлов

### **Аннотация:**

В статье рассмотрен вопрос моделирования процессов теплообмена и массообмена при течении биотоплив по трубопроводам теплообменников авиационных двигателей в условиях термодеструкции топлива и образования коксоотложений на внутренних стенках трубопроводов. Предложены математические зависимости, на основании которых могут быть рассчитаны изменения среднемаховых параметров топлива, толщина отложений кокса, температура стенки трубопровода, степень разложения топлива на стенке, гидравлические характеристики потока топлива по длине трубы.

### **Ключевые слова:**

биотопливо, теплообмен, массообмен, термодеструкция, коксоотложение, модель процесса.

Рассмотрим турбулентное течение углеводородных биотоплив в обогреваемых трубах в предположении, что термическим разложением топлив в ядре потока можно пренебречь, а реакция разложения протекает вблизи стенки трубы, причем с течением времени на стенке выделяются коксоотложения. В результате образования отложений сечение канала постепенно сужается к концу. Химические реакции, протекающие на стенке, предполагаются необратимыми.

С учетом переменного по длине проходного сечения трубы уравнения сохранения в 1D-постановке имеют вид:

- уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(\rho u S)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

- уравнение количества движения

$$\frac{dP}{dx} = \frac{G^2}{\rho} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\xi}{2d} \right), \quad (2)$$

- уравнение сохранения энергии

$$\frac{dH}{dx} = \frac{4q_w}{Gd}, \quad (3)$$

- уравнение баланса продуктов реакции

$$\frac{dZ_m}{dx} = \frac{4j_w}{Gd}, \quad (4)$$

где коэффициент сопротивления трения  $\xi$  может быть рассчитан по уравнению Филоненко

$$\xi = (1,82 \lg Re_w - 1,64)^{-2} \quad (5)$$

Для определения плотности диффузионного потока используется кинетическое соотношение

$$j_w = B \exp\left(-\frac{E}{RT_w}\right) (1 - Z_w) P^{0,5} \rho_w^{-2} \quad (6)$$

Принималось  $B = 5 \cdot 10^7$  ед.СИ,  $E/R = 2,5 \cdot 10^3$  К.

В уравнениях (1 - 6) для расчета гидродинамических параметров использовался диаметр  $d$ , равный диаметру смачиваемой поверхности отложений толщиной  $\delta$ , температура смачиваемой поверхности отложений  $T = T_w$ ,  $S = \pi d^2/4$ .

В экспериментах при пропускании электрического тока по трубке, по которой протекает топливо, выделяется тепловая энергия, часть которой расходуется на разложение биотоплива, другая часть на его подогрев. Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$q_w = q_D + q_k, \quad (7)$$

где:  $q_D = j_w Q$ . (8)

Теплота реакции  $Q$  рассчитывается по разности энтальпий полностью разложившегося и неразложившегося вещества

$$Q = H_{(z=1)} - H_{(z=0)} \quad (9)$$

Конвективный тепловой поток  $q_k$  и диффузионный поток  $j_w$  определяются по уравнениям:

$$q_k = \alpha (T_w - T), \quad (10)$$

$$j_w = \beta (Z_w - Z). \quad (11)$$

Расчет коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  и массоотдачи  $\beta$  производится по методике, учитывающей разложение топлива вблизи стенки канала и с использованием зависимостей теплофизических свойств топлив от давления и температуры.

Влияние термической деструкции на тепломассообмен учитывается при помощи эффективной скорости вдува, которая связана с изменением среднемассовой скорости потока по длине канала соотношением

$$V_w = -\frac{1}{\pi d} \frac{d(Su)}{dx} = \frac{M}{\rho} \left( \frac{1}{M_1} - \frac{1}{M_2} \right) j_w. \quad (12)$$

Здесь  $M$  – молекулярная масса смеси газов, состоящей из молекул исходного продукта с молекулярной массой  $M_1$  и массовой концентрацией  $C_1 = 1-Z$ , продуктов разложения с молекулярной массой  $M_2$  и массовой концентрацией  $C_2 = Z$ .

Теплофизические свойства топлив определялись в зависимости от давления, температуры (энтальпии) и химического состава.

Толщина коксоотложений определялась по уравнению

$$\delta_n = \frac{\dot{W}_n \tau_n}{\rho_n}, \quad (13)$$

где: среднемассовая скорость образования пироуглерода определяется по уравнению

$$W_n = K_o \exp(-E_n / RT_w) P \quad (14)$$

Энергия активации и константа химической реакции образования пироуглерода в зависимости от периода нагревания определялись по уравнениям:

1)  $\tau_n \leq 3600$  с

$$K_o = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ кг/н.с}; \quad E/R = 13205 \text{ К};$$

2)  $3600 \leq \tau_n < 18000$  с

$$K_o = 9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/н.с}; \quad E/R = 21394 \text{ К};$$

Плотность пироуглерода  $\rho_n = 1,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Рассматривается теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку, образованную трубками из различного материала и слоем кокса. Принято, что тепловыделение при пропускании электрического тока всегда происходит во внешней трубке, выполненной из нержавеющей стали. Теплоотводом в окружающую среду пренебрегалось. Тепло отводится со стороны отложений пироуглерода, омываемых турбулентным потоком топлива. При таких условиях расчет температуры наружной поверхности стенки канала производится по уравнению:

$$(T_w)_N = T_w + q_w \frac{R_2 + \delta}{2} \left\{ \frac{\ln R_2 / R_1}{\lambda_{\text{п}}} + \frac{\ln (R_2 + \delta_m) / R_2}{\lambda_m} + \right. \\ \left. + \left[ 2 \ln \frac{R_3 + \delta_m}{R_2 + \delta_m} + \left( \frac{R_2 + \delta_m}{R_3 + \delta_m} \right)^2 - 1 \right] \frac{(R_3 + \delta_m)^2}{[(R_3 + \delta_m)^2 - (R_2 + \delta_m)^2] \lambda_{\text{ст}}} \right\} \quad (15)$$

Здесь  $q_w$  и  $T_w$  - плотность теплового потока от смачиваемой поверхности коксоотложений и ее температура;  $\lambda_{\text{п}}$ ,  $\lambda_m$ ,  $\lambda_{\text{ст}}$  - коэффициент теплопроводности кокса, меди и стали;  $R_1 = \frac{d}{2}$  - радиус смачиваемой цилиндрической поверхности отложений пироуглерода;  $R_2 + \delta_m$  и  $R_3 + \delta_m$  - радиусы внутренней и наружной поверхностей трубки из нержавеющей стали;  $\delta_m$  - толщина стенки медной трубки.

Принято, что теплопроводность материалов не зависит от температуры,  $\lambda_{\text{п}} = 8$  Вт/(м·К),  $\lambda_m = 390$  Вт/(м·К);  $\lambda_{\text{ст}} = 21$  Вт/(м·К).

Таким образом, используя в качестве граничных условий на входе: давление ( $P_{\text{вх}}$ ), температуру ( $T_{\text{вх}}$ ), расход ( $G = \rho u S$ ) при отсутствии продуктов разложения ( $Z = 0$ ), при заданных тепловых в потоках от стенки канала ( $q_w$ ) и продолжительности нагрева ( $\tau_p$ ), на основании уравнений (5, 6, 12 - 15) и зависимостей теплофизических свойств от параметров потока могут быть рассчитаны изменения среднемассовых параметров топлива, толщина отложений  $\delta_{\text{п}}$ , температура стенки  $T_w$ , степень разложения на стенке  $Z_w$ , гидравлические характеристики ( $\xi, \zeta$ ) потока по длине трубы.

### Библиографический список

1. Федоров Е.П., Яновский Л.С., Евсеев А.И. и др. Экспериментальная установка для исследования теплообмена и процессов горения углеводородов. //Изв. ВУЗов. Авиационная техника. - 1989. №4. -С. 92-93.
2. Шубин С.А., Шевченко И.В., Яновский Л.С., Харин А.А. Реактивные топлива и методы оценки их качества. Учебное пособие. -М. «МАТИ» - РГТУ им.К.Э.Циолковского, 2001. -59с.
3. Шигабиев Т.Н., Яновский Л.С., Галимов Ф.М. и др. Физический и химический хладоресурс углеводородных топлив. -Казань: Мастер Лайн, 2000., -240с.
4. Киришев Е.Л., Попов В.Г., Потапов А.Ю. и др. Топливо-воздушные теплообменники авиационных двигателей. -М.:МАТИ, 2008. С.34.

5. Федоров Е.П., Яновский Л.С., Краснюк В.И. и др. Интенсификация теплообмена в обогреваемых каналах при течении углеводородов сверхкритического давления / В Сб. Современные проблемы гидродинамики и теплообмена в элементах энергетических установок и криогенной техники. -М.:ВЗМИ, 1986, С.10-17.

6. Яновский Л.С., Мякочин А.С., Сергеев А.В. Интенсификация теплоотдачи при течении в горизонтальных и вертикальных каналах органических теплоносителей при до- и сверхкритических давлениях / В Сб. Проблемы энергетики воздушного транспорта. – 1989. - С.199-206.- (Тр.ЦИАМ; №1272).

### **Сведения об авторах**

Яновский Леонид Самойлович, начальник отдела химмотологии ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова", профессор, д.т.н., e-mail:eanovski@ciam.ru

Казаков Вячеслав Александрович, профессор Российского государственного университета инновационных технологий и предпринимательства, д.т.н., e-mail:info@itbu.ru

Павлов Виктор Владимирович, профессор Российского государственного университета инновационных технологий и предпринимательства, д.т.н., e-mail:info@itbu.ru