

*С.М.Беднов<sup>1</sup>, В.И.Быков<sup>2</sup>, М.Д.Диев<sup>2</sup>*

Исследовательский центр им. М.В.Келдыша, Москва, Россия (1)  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия (2)

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАКОКСОВЫВАНИЯ ПРОТОЧНЫХ КАНАЛОВ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА**

### **АННОТАЦИЯ**

Приведена достаточно простая математическая модель процесса осаждения твердой фазы на стенках каналов системы охлаждения двигателей. Для углеводородных топлив в условиях, приближенных к условиям в охлаждающих системах высокого давления построена модель тепломассопереноса с фазовыми превращениями, химической деструкцией и закоксовыванием стенок каналов течения. Проведены расчеты для процесса разложения углеводородных топлив в медных трубках с конкретной кинетикой и феноменологической кинетикой отложения твердой фазы на стенках канала. Результаты расчетов качественно согласуются с экспериментальными данными.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

В современных двигателях летательных аппаратов углеводородное топливо часто используется как охладитель теплонепригодных элементов конструкций. Особенностью, сильно осложняющей адекватное моделирование термогидродинамических процессов, происходящих в проточных каналах, является то, что топливо находится под сверхкритическим давлением. Эта область термодинамических параметров отличается спецификой, учет которой обычно затруднен.

Как известно, повышение давления в системе охлаждения двигателя ведет к увеличению теплового потока. Для углеводородных топлив система охлаждения сохраняет работоспособность, пока температура стенки не станет равной температуре термического разложения топлива, или так называемой температуре коксования. При этом происходит осаждение твердой фазы на стенку проточного канала, что вызывает увеличение ее полного термического сопротивления, быстрое повышение температуры и ее разрушению. До настоящего времени нет полного понимания и соответственно адекватного количественного описания всей совокупности теплофизических и химических процессов, протекающих в каналах системы охлаждения ракетных двигателей. Из общих соображений понятно, что в сверхкритических условиях процесс закоксовывания каналов включает разложение исходного углеводородного топлива, осаждение свободных радикалов на поверхности металлов и их коксование. Иногда дополнительная очистка топлива и его модификация улучшают его термическую стабильность и уменьшают образование твердой фазы. С другой стороны, термические реакции разложения могут ускоряться

в присутствии поверхности металлического катализатора, например, меди.

В [1] исследовались характеристики теплообмена и скорости осаждения при течении ракетного топлива RP-1, технически чистого пропана, промышленного пропана и смеси топлива RP-1 и пропана. Течение происходило в медной трубке с внутренним диаметром 1,96 мм с длиной обогреваемого переменным электрическим током участка 38,1 мм. Скорость в опытах составляла до 30 м/с, давление топлива на входе — 13,8 МПа, начальная температура стенки — до 700 К. В экспериментах зафиксирован факт наличия максимума скорости осаждения углерода, который по мере увеличения скорости топлива сдвигается в сторону повышенной температуры.

В аналогичной работе [2] были получены данные о максимальной скорости роста термического сопротивления стенки трубы за счет осаждения углерода, которая при скорости течения топлива RP-1 в 20 м/с составляет около  $2 \text{ К}\cdot\text{м}^2/\text{Дж}$  (размерность величины заимствована из [2]).

В [3] описаны результаты исследования теплообмена при течении керосина марки РТ сверхкритических параметров в трубках длиной 1 м с внутренним диаметром от 1 до 4 мм. Основное внимание было уделено изучению интенсифицирующего действия накатки — способа, всесторонне изучавшегося авторами. В опытах было обнаружено относительное ухудшение теплообмена при некоторых сочетаниях режимных параметров.

Эксперименты, проведенные в Центре Келдыша, дали результаты, качественно подтверждаемые предлагаемой методикой. Опыты проводились при течении углеводородного топлива сверхкритического давления в медной трубке, нагрев средней части которой проводился за счет непосредственного пропускания электрического тока. Контроль температуры осуществлялся с помощью тепловизора. Полученные продольные распределения температуры трубки дали парадоксальные, на первый взгляд, результаты. В средней части трубки по истечении некоторого времени наблюдается «провал» температуры. Объяснение этого факта, по-видимому, следует искать в том, что с началом термического разложения жидкости начинается и интенсивный «сток» теплоты и, кроме того, начинается отложение углерода, т.е. образование теплоизолирующего слоя.

В данной работе предложена математическая модель процесса осаждения твердой фазы на стенках каналов системы охлаждения двигателей. Для углеводородных топлив в условиях, приближенных к условиям стандартной методики, построена модель тепломассопереноса с фазовыми превращениями, химической деструкцией и закоксовыванием стенок каналов течения. Проведены расчеты для процесса разложения углеводородного топлива в единичной медной трубке с конкретной кинетикой и феноменологической кинетикой отложения твердой фазы на стенках канала.

## 2. ОПИСАНИЕ ОБЩЕЙ МОДЕЛИ

Рассматриваются процессы тепломассопереноса в трубке с металлическими стенками, внутренняя поверхность которых обладает каталитическими свойствами. В качестве идеализации процессов в жидкой фазе используется приближение идеального вытеснения. Уравнения материального и теплового балансов для движения и разложения топлива в канале имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial l} &= \Sigma \gamma_s w_s + \Sigma \gamma_s^* w_s, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial l} &= \Sigma (\Delta H_s) w_s + \alpha (T_* - T). \end{aligned} \quad (1)$$

Стехиометрические векторы  $\gamma_s, \gamma_s^*$  отвечают заданным механизмам химических превращений в жидкой фазе и процессам взаимодействия интермедиатов со стенкой. В систему (1) в качестве параметров входят плотность, теплоемкость реагирующей смеси, константы скоростей стадий и их температурные зависимости, геометрические характеристики канала и др.

Для каталитической поверхности имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_*}{\partial t} &= \Sigma (\Delta H_s) w_s + \beta (T - T_*) + \delta (T_0 - T_*), \\ \frac{\partial x}{\partial t} &= \Sigma \gamma_s^* w_s. \end{aligned} \quad (2)$$

В правых частях системы (2) учитываются вклады тепловых и химических процессов на стенке канала, а также ее нагрев электрическим током.

В уравнении теплового баланса системы (2) может присутствовать член, отвечающий конечной теплопроводности материала стенки канала  $D_T \Delta T_*$ . Характер зависимостей скоростей реакций  $w_s(c, x, T)$  или  $w_s(c, x, T^*)$  от концентраций веществ в потоке и на поверхности катализатора задается в соответствии с принимаемой кинетикой процессов. Предполагается, что реакция идет без существенного изменения объема, так что скорость  $v = \text{const}$ . Модель (1), (2) является нестационарной и двухтемпературной, так как нестационарность и неизотермичность трубки обусловлена нестационарностью и неизотермичностью процессов в жидкой фазе. С учетом осаждения углеводородов на поверхности металла и их последующим закоксовыванием коэффициенты теплообмена  $\alpha, \beta$  существенно

зависят от концентрации твердой фазы на поверхности катализатора. Уравнение теплового баланса для стенки канала содержит источниковый член  $Q(T_*)$ , отвечающий джоулеву нагреву металлической трубки электрическим током.

Система дифференциальных уравнений (1), (2) должна быть дополнена соответствующими начальными и краевыми условиями. Например,

$$\begin{aligned} t = 0: x &= x^\circ(l), \quad T_* = T_*(l), \\ c &= c^\circ(l), \quad T = T^\circ(l), \quad 0 \leq l \leq l_k; \\ l = 0: c &= c_{in}(t), \quad T = T_{in}(t), \quad 0 \leq t \leq t_k. \end{aligned} \quad (3)$$

Условия (3) отражают возможность варьирования для модели (1), (2) начальных профилей концентраций и температуры, а также входных режимов.

Для численного решения модели (1)—(3) может быть предложен (например, при  $D_T = 0$ ) метод характеристик в комбинации с одним из алгоритмов интегрирования систем жестких обыкновенных дифференциальных уравнений, каковыми являются уравнения нестационарной химической кинетики.

В результате расчетов могут быть получены профили концентраций и температур по длине трубки и исследована динамика их изменения во времени при различных режимах процесса. Варьирование геометрических и теплофизических параметров, а также исследование условий термической стабильности позволяет найти режимы, в определенном смысле оптимальные, определить лимитирующие факторы, согласовать физические представления о процессе с имеющимися экспериментальными данными.

## 3. КОНКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Расчеты проводились для процесса термического разложения углеводородного топлива в медной трубке. Брутто-схема превращений принималась последовательной:



Первая реакция в (4) отвечает термическому разложению углеводородного топлива, вторая — осаждению твердой фазы на поверхности меди. Кинетические параметры разложения углеводородного топлива на меди были определены ранее. В данной работе для второй стадии принималась кинетика первого порядка.

Общая модель (1)—(3) в нашем случае конкретизируется следующим образом:

- уравнения тепломассопереноса для жидкой фазы записываются в соответствии с (4):

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_1}{\partial t} + v \frac{\partial x_1}{\partial l} &= -w_1, \\ \frac{\partial x_2}{\partial t} + v \frac{\partial x_2}{\partial l} &= w_1 - w_2, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial l} &= Q_1 w_1 + \alpha(z)(T_* - T); \end{aligned} \quad (5)$$

- тепловой и материальный балансы для каталитической поверхности

$$\frac{\partial T_*}{\partial t} = D_T \Delta T_* + Q(T_*) + \beta(z)(T - T_*), \quad (6)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = w_2;$$

- относительные скорости реакций

$$w_1 = k_1 x_1^n (a + (1 - x_1)^m), \quad (7)$$

$$w_2 = k_2 x_2;$$

- константы скоростей стадий (4)

$$k_i = k_i^0 \exp(-E_i / RT), \quad i = 1, 2;$$

- функция тепловыделения за счет джоулева нагрева медной трубки

$$Q(T_*) = a_1 (a_2 + a_3 T_*);$$

- приведенный коэффициент теплообмена между жидкой фазой и медной стенкой канала:

$$\alpha(z) = \alpha_0 / (1 + z / \varepsilon), \quad \beta(z) = \beta_0 \alpha(z);$$

- начальные и входные данные типа (3)

$$z(0, l) = 0, \quad x_1(t, 0) = 1, \quad x_2(t, 0) = 0, \quad (8)$$

$$T(t, 0) = T^0, \quad T_*(0, l) = T_*^0.$$

Решение системы дифференциальных уравнений (5)—(8) позволяет получить профили температур и концентраций и исследовать их поведение во времени. При значениях параметров, отвечающих условиям проведения эксперимента, получены расчетные профили тепловых полей, характеристики которых согласуются с экспериментальными данными.

Динамика процесса такова: сначала формируется профиль температуры с характерным прогибом в средней части канала, затем по мере накопления твердой фазы на медной стенке процесс теряет термическую устойчивость и температура начинает резко возрастать.

Прогиб температуры в начале процесса определяется поглощением тепла при разложении углеводородного топлива. Положение температурного минимума по длине существенно зависит от скорости потока жидкости. В экспериментальной установке теплофизические, гидродинамические и химические параметры таковы, что минимум температуры наблюдается в средней части медной трубки. Это означает, что максимум скорости термического разложения углеводородного топлива приходится на половину длины канала. Такое же поведение наблюдается и в расчетах, что является косвенным подтверждением адекватности предлагаемой модели (5)—(8).

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Расчеты по предложенной модели иллюстрируются на рисунках.

В начальный момент времени формируется температурный профиль с характерным минимумом в средней части канала. Его положение отвечает участку интенсивного разложения топлива. Далее по мере накопления на стенке канала твердых углеводородов система теряет устойчивость и температура стенки начинает резко расти.

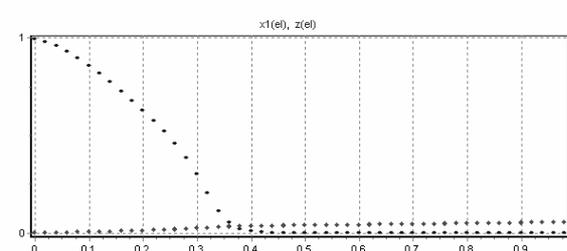
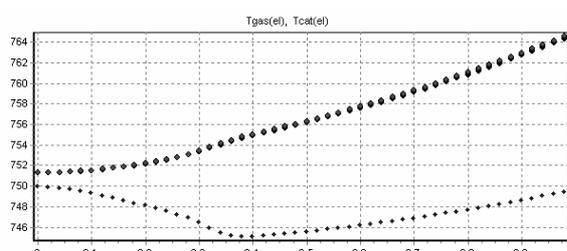
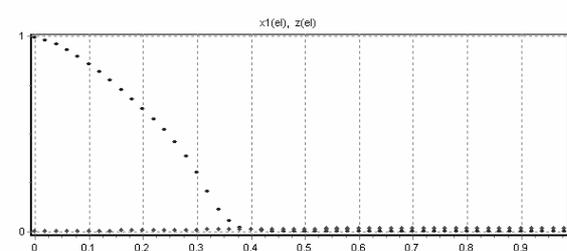
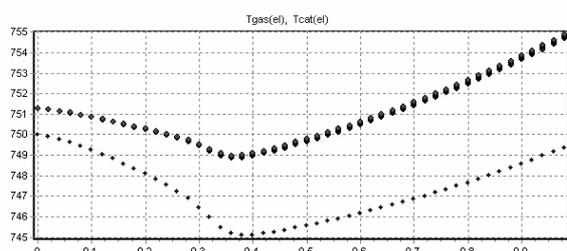
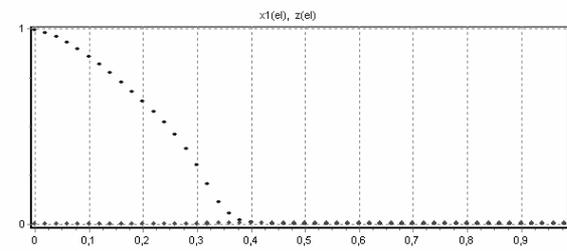
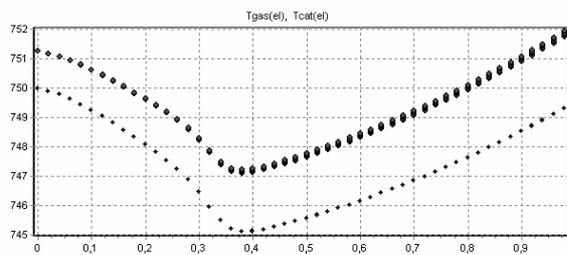


Рис.1. Профили температур и концентраций в различные моменты времени:  $t = 0.5; 3; 10$ .  $v = 3$

При увеличении скорости потока (рис. 2.) температурный минимум смещается к правому концу канала, т.к. с ростом  $v$  участок интенсивного разложения топлива сдвигается вправо.

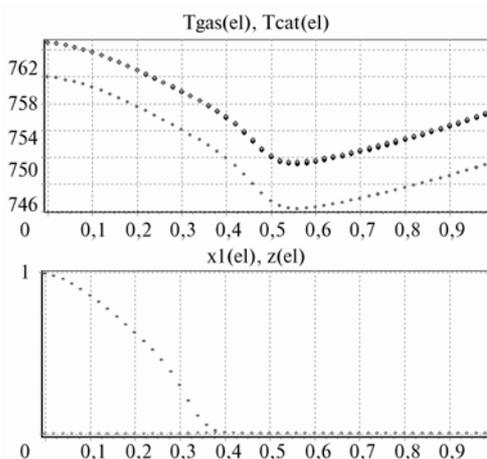


Рис. 2. Профили температур и концентраций при увеличении скорости потока:  $v = 6$ ;  $t = 0.5$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс потери термической устойчивости углеводородных топлив в системе охлаждения двигателей является достаточно сложным и в деталях неизученным. Он включает фазовые переходы, химическую деструкцию топлива, адсорбцию свободных радикалов на металлической поверхности, которая зачастую обладает катализирующими свойствами, осаждение твердой фазы на поверхности канала, в конечном счете и приводящее к потере устойчивости. В данной работе предложена достаточно простая математическая модель, которая учитывает перечисленные составляющие процесса. На данном этапе исследования анализ был ограничен применением феноменологических зависимостей без рассмотрения детальных механизмов разложения топлива и осаждения на стенках канала твердой фазы. Для углеводородных топлив в условиях, приближенных к условиям стандартной методики, построена модель тепломассопереноса с фазовыми превращениями, химической деструкцией и закоксовыванием стенок каналов течения. Проведены расчеты для процесса разложения углеводородного топлива в медной трубке с конкретной кинетикой и феноменологической кинетикой отложения твердой фазы на стенках канала. Результаты расчетов качественно согласуются с экспериментальными данными.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $a_i$  — параметры функции  $Q(T_*)$ ;
- $a, n, m$  — параметры автокаталитической кинетической зависимости реакции разложения углеводорода в присутствии стенки;
- $c, x$  — векторы концентраций реагентов в жидкой фазе и на поверхности;
- $c^\circ, x^\circ, T^\circ, T_*^\circ$  — начальные данные для концентраций и температур;
- $c_{in}, T_{in}$  — концентрации реагентов и температура потока на входе в канал;
- $k_i, k_i^\circ, E_i$  — константа скорости, предэкспонента и энергия активации  $i$ -й реакции;
- $l$  — текущая длина канала, м;
- $Q$  — функция тепловыделения за счет джоулева нагрева металла электрическим током;
- $R$  — универсальная газовая постоянная;
- $t$  — время;
- $T, T_*$  — температура потока и стенки канала;
- $T_\infty$  — температура окружающей среды, К;
- $v$  — скорость потока, м/с;
- $w_s$  — скорость  $s$ -й реакции;
- $X_1, X_2, Z$  — символы веществ;
- $z$  — концентрация твердой фазы углеводородов на поверхности металла (степень закоксованности внутренней поверхности канала);
- $\alpha_f$  — коэффициент теплоотдачи между потоком жидкости и металлической стенкой, Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- $\alpha_\infty$  — коэффициент теплообмена с окружающей средой, Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- $\alpha_0, \beta_0, \varepsilon$  — параметры функции  $\alpha(z)$ ;
- $\Delta$  — оператор Лапласа;
- $\Delta H_s$  — тепловой  $s$ -й эффект реакции;
- $\gamma_s, \gamma_s^*$  — стехиометрические векторы реакций в жидкой фазе и на поверхности катализатора;
- $\lambda_w$  — теплопроводность материала стенки канала, Вт/(м·К);

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джованетти А.Дж., Спадаччини Л.Дж., Сетела Ю.Дж. Характеристики теплопереноса и способность к осаждению твердой фазы углеводородных ракетных топлив // Аэрокосмическая техника. 1985. С. 164—172.
2. Roback R., Szetela E.J., Spadaccini L.J. Deposit Formation in Hydrocarbon Rocket Fuels // Journal of Engineering for Power. Transactions of ASME. 1983. Vol. 105, № 1. P. 59—65.
3. Эффективные поверхности теплообмена / Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З., Мякочин А.С. - М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.