

*Л.С. Яновский<sup>1</sup>, А.В. Байков<sup>1</sup>, С.И. Мартыненко<sup>1</sup>, А.С. Мякочин<sup>2</sup>*

ФГУП Центральный Институт Авиационного Моторостроения им. П.И. Баранова, Москва, Россия (1)  
Московский Авиационный Институт (технический университет), Москва, Россия (2)

## **НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ**

### **АННОТАЦИЯ**

В докладе представлены новые методы определения коэффициентов теплоотдачи и кинетических характеристик процесса термического разложения углеводородного топлива при вынужденном конвективном течении топлива в обогреваемом канале с малыми поперечными размерами.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одной из основных проблем, возникающих при создании гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) с скоростью полета превосходящей 6 М, является охлаждение конструкции летательного аппарата. Атмосферный воздух, обтекающий летательный аппарат, при таких скоростях полета уже не может быть охладителем. В настоящее время считается, что проблема охлаждения ГЛА может быть решена за счет применения эндотермических углеводородных топлив, которые при нагревании разлагаются на более простые углеводородные соединения и поглощают при этом большое количество тепла.

По величине суммарного хладоресурса на единицу теплоты сгорания топлива углеводородные эндотермические топлива находятся на уровне, близком к жидкому водороду, что позволяет обеспечить эффективное охлаждение силовых установок и конструкции ГЛА [1].

Проектирование интенсивно нагруженной в тепловом отношении конструкции ГЛА требует повышенной точности расчета температур охлаждаемых стенок, что невозможно без точного описания процесса термического разложения топлива и знания того, как процесс разложения топлива влияет на вынужденный конвективный теплообмен в каналах системы охлаждения.

Для решения этих задач, были проведены специальные экспериментальные исследования. Известно, что термическое разложение углеводородов представляет собой очень сложный химический процесс, который протекает по механизму цепной реакции [2]. Даже небольшие изменения состава реагирующей смеси и условий протекания реакции могут привести к значительным изменениям в механизме реакции и составе образующихся продуктов реакции [3]. Поэтому исследования процесса термического разложения проводились при давлениях и температурах воспроизводящих

реальные условия в каналах системы охлаждения ГЛА.

Проведенный комплекс экспериментальных исследований, касался прежде всего процесса термического разложения топлива, и вынужденного конвективного теплообмена с стенками охлаждаемого канала. Цель проведенной работы состояла в разработке усовершенствованных математических моделей вышеупомянутых процессов на базе проведенных экспериментальных исследований.

### **1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДИВШИХСЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Схема экспериментальной установки применявшейся для исследования процесса термохимического разложения эндотермических топлив представлена на рис 1.

Установка состояла из экспериментального реактора (6), который нагревался от регулируемого источника электрического тока, сепаратора (12) и линии отбора проб (13). Продукты разложения, выходящие из реактора, охлаждались при прохождении через холодильник (8) и разделялись на жидкую и твердую фазы в сепараторе (12).

Исследуемое топливо подавалось в реактор из расходной емкости (1) плунжерным лабораторным насосом (5) и перед подачей в реактор дополнительно подогревалось в подогревателе (3). Повышенное давление в установке создавалось путем заполнения рабочей части сжатым азотом из стенового баллона (17). После начала подачи топлива, азот вытеснялся из системы парами исследуемого топлива. Накапливающиеся в сепараторе (12) газообразные продукты распада периодически сбрасывались через дренажную систему (15). Количество газа, ушедшее в систему отбора проб, определялось с помощью газового расходомера (14).

На рис. 2 представлены типичные для описанной установки экспериментальные результаты. На ней изображены расчетные и экспериментальные распределения температур стенки и топлива по длине экспериментального реактора, в эксперименте при котором степень

разложения эндотермического топлива ("NORPAR -12") достигала 91%.

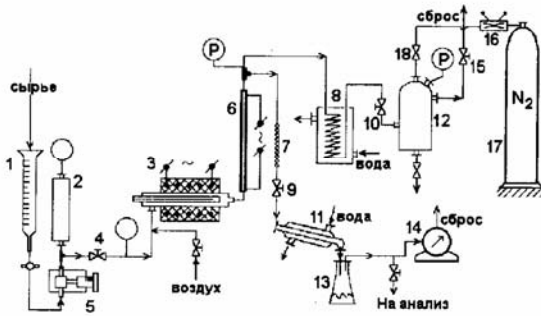


Рис 1 Схема рабочей части экспериментальной установки предназначенной для проведения кратковременных экспериментов по исследованию процесса термического разложения углеводородных соединений в обогреваемом канале при сверхкритических параметрах.

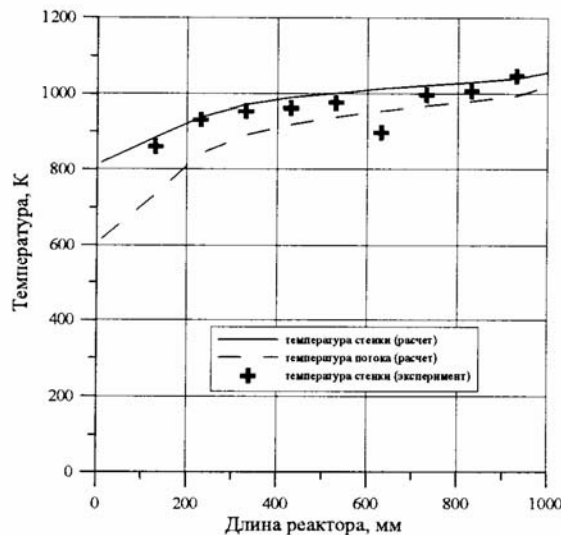


Рис 2 Расчетное и экспериментальное распределение температуры стенок и топлива по длине реактора в эксперименте, когда степень разложения эндотермического топлива достигала 91 %

длина реактора – 1000 мм;  
 внутренний диаметр реактора – 2,4 мм;  
 расход топлива – 0,2 г/сек;  
 температура топлива на входе в реактор - 300° С;  
 время пребывания топлива в реакторе – 1,8 сек.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО – И МАССООБМЕНА В ЭНДОТЕРМИЧЕСКОМ ТОПЛИВЕ.

Проведенные эксперименты подтвердили, что зависимость скорости термического разложения эндотермического топлива имеет нелинейный характер. Анализ экспериментальных данных делает возможным

предложить следующее уравнение для описания процесса термического разложения:

$$\frac{1}{Z} = a + b \cdot \frac{1}{t} \quad (1)$$

При  $\tau \rightarrow \infty$   $1/Z \rightarrow a$ . Ясно, что константа  $a$  определяет значение равновесной степени разложения -  $Z_{ex}$ , которая достигается спустя некоторое время после начала процесса и далее не изменяется, если не изменяется температура. Функции  $1/a$  и  $1/b$  в зависимости от температуры аппроксимируются уравнениями типа Аррениуса.

Естественно, что такие формулы хорошо описывают кинетику процесса разложения лишь в ограниченном диапазоне степеней разложения. Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  в более широком диапазоне степеней разложения можно получить, если перейти к решению задачи о поиске минимума функционала невязки между расчетными и экспериментальными данными по степени разложения для  $n$ , проведенных при разных температурах на выходе из реактора, экспериментов:

$$\Phi = \max \left\{ \left( \frac{Z - Z_{ex}}{Z_{ex}} \right)_i \right\}_{i=1, \dots, n} \quad (2)$$

В функционале (2)  $Z$  - расчетная степень разложения, получаемая в случае закона разложения (1), в виде интеграла:

$$Z = \int_0^1 \frac{(1 - a \cdot Z)^2}{W_f \cdot b} \cdot dx \quad (3)$$

Задача (2), (3) в общем случае является математически некорректной. Для решения таких задач существуют специальные алгоритмы, из которых наиболее распространенным и универсальным является алгоритм А.Н. Тихонова [4]. Однако непосредственное применение данного алгоритма к решению рассматриваемой задачи не дает хороших результатов. Если же для стабилизации решения в алгоритме Тихонова применить стабилизирующий функционал:

$$\Omega = \sum_{j=1}^m \left[ \left( \frac{a - a_0}{a_0} \right)^2 + \left( \frac{b - b_0}{b_0} \right)^2 + \left( \frac{\frac{1}{b} \cdot \frac{db}{dT_f} - \frac{1}{b_0} \cdot \frac{db_0}{dT_f}}{\frac{1}{b_0} \cdot \frac{db_0}{dT_f}} \right)^2 \right];$$

в котором  $a_0$  и  $b_0$  - ранее полученные экспериментальные приближенные зависимости, аппроксимируемые уравнениями типа Аррениуса, то полученное решение соответствует известным кинстическим закономерностям и точно соответствует экспериментальным данным по степени разложения эндотермического топлива при различных температурах (рис 3).

Для определения коэффициента теплоотдачи в обогреваемых каналах, по которым протекает

теплоноситель, находящийся при сверхкритических параметрах, традиционно

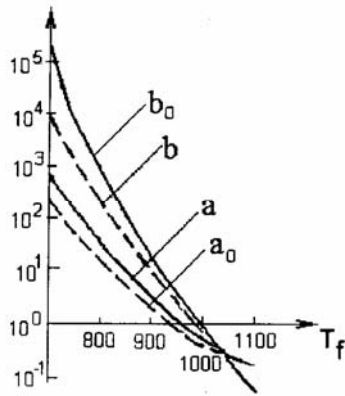


Рис. 3 Зависимость значений кинетических коэффициентов  $a$  и  $b$  от температуры  $T_f$  в выражении (1), восстановленная по результатам экспериментов с использованием алгоритма А.Н. Тихонова в случае стабилизирующего функционала составленного с использованием приближенных аппроксимирующих соотношений.

используются критериальные уравнения типа [5]:

$$Nu = Re^a \cdot Pr^b \cdot \theta^c \quad (4)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  - некоторые степенные параметры.

Для повышения точности применяемых критериальных уравнений, неоднократно предпринимались попытки введения тех или иных поправок, на базе проведенных экспериментов. Типичным представителем этих работ, является работа американских исследователей [6], в которой результаты многочисленных экспериментов обобщались в виде формулы типа:

$$Nu = C \cdot Re^a \cdot Pr^b \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^c \cdot \left(\frac{\lambda_f}{\lambda_w}\right)^d \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_w}\right)^e \cdot \left(\frac{C_{p,f}}{C_{p,w}}\right)^f \quad (5)$$

Основным недостатком таких формул является постоянство степенных параметров. Легко показать, что они должны быть переменными по длине канала.

Переменность степенных параметров вызвана прежде всего переходом течения в канале на автомодельный режим, когда гидравлическое сопротивление канала становится независимым от числа Рейнольдса.

В условиях характерных для ГЛА, когда имеется большое количество каналов с малым эквивалентным гидравлическим диаметром  $d_e \sim 1 \div 1,5$  мм и относительно большой шероховатостью  $K_s \sim 0,02 \div 0,1$  мм., переход к автомодельному режиму течения оказывается очень важен. В автомодельном режиме заметно интенсифицируется теплообмен, и соответственно возрастают значения критерия Нуссельта.

Для уточненного представления результатов, относящихся к каналам охлаждения с малыми поперечными размерами, вместо критериальных уравнений типа (5), можно предложить известную критериальную зависимость Б.С. Петухова – В.В. Кириллова [5], дополненную корректирующими зависимостями, учитывающими влияние  $\theta$  и некоторых других факторов на теплообмен. Т.е. применительно к каналам с малыми поперечными размерами, формула (4) должна иметь следующий вид:

$$Nu = Nu_0 \cdot \theta^{0,4} \cdot f(Re_0, Re) \quad (6)$$

В этой формуле  $Nu_0$  определяется по формуле Б.С. Петухова – В.В. Кириллова [5], а  $f(Re_0, Re)$  представляет собой корректировочную функцию, уточняющую величину  $Nu$ .

Для конкретного эксперимента несложно подобрать свою корректировочную зависимость, которая улучшит совпадение экспериментальных и расчетных результатов.

В общем случае, проведя ряд экспериментов, можно получить «куст» корректировочных зависимостей, каждая «ветка» которого реализуется в определенном эксперименте или в эксперименте с достаточно близкими к исходному эксперименту параметрами. Выбор «ветки», которая реализуется в конкретном случае, определяется набором заранее сформулированных правил выбора и величиной определяющих этот выбор критериев. Если рассматриваемый случай не попадает ни на одну из «веток», то производится линейная интерполяция определяемых параметров между двумя ближайшими «ветками».

Такие зависимости в настоящее время получили название нечетких функций (Fuzzy Functions) [7]. Смысл их применения заключается в том, что «размытое», «нечеткое» представление корректирующих зависимостей позволяет существенно увеличить конечную точность представления экспериментальных данных.

Так, например, на рис 4 представлены результаты экспериментов, проводившихся на вышеописанной установке с реакторами, с внутренними диаметрами  $2 \div 5,2$  мм при шероховатости стенок  $\sim 0,01$  мм.

Как следует из рис 4, применение «нечеткой» корректирующей зависимости позволило увеличить точность представления экспериментальных данных с 15 % до 4,5 %.

Конечно, такая зависимость является более сложной, по сравнению с традиционными расчетными зависимостями. Но она составлена из простейших операций и поэтому время на проведение вычислений «нечеткой» функции может оказаться меньше времени на вычисление «традиционной» функции типа (5).

Одной из основных характеристик любой «нечеткой» функции является комплекс определяющих параметров. Применительно к

рассматриваемой задаче, к определяющим параметрам относятся входное число Рейнольдса –  $Re_0$  которое определяется в зависимости от расхода топлива в канале; относительная шероховатость стенок канала –  $\bar{K}_s$ :  $\bar{K}_s = \frac{2 \cdot K_s}{d_e}$  и величина тепловой нагрузки –  $H_Q$ .

Величина тепловой нагрузки определяется как отношение  $H_Q = \frac{q_w}{\rho \cdot W}$ , где  $q_w$  – тепловой поток попадающий в топливо с стенок охлаждаемого канала, а  $\rho \cdot W$  – массовая скорость топлива в канале. Как показано в [2], если величина  $H_Q$  превосходит некоторое критическое значение, то коэффициент теплоотдачи существенно уменьшается.

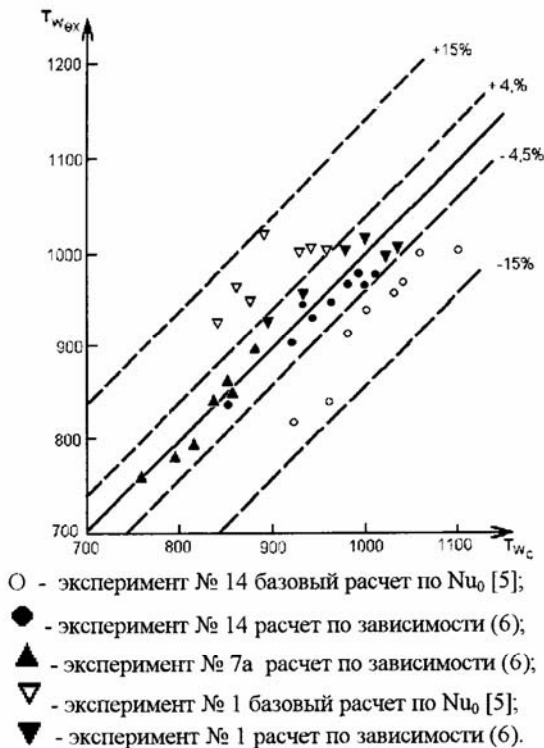


Рис 4 Сравнительная точность расчета процесса вынужденной конвекции по базовой зависимости и уточненной зависимости полученной при введении «нечеткой» корректирующей функции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена нелинейная математическая модель процесса термического разложения эндотермического топлива.
2. Разработана методика определения кинетических параметров математической модели по результатам проведенных экспериментов.
3. Предложена новая методика построения корректирующих функций для

критериальных уравнений, позволяющая описывать результаты теплофизических экспериментов с точностью  $\pm 4,5\%$ .

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$Nu, Re, Pr$  – критерии Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля  
 $\mu$  – вязкость топлива  
 $\lambda$  – теплопроводность топлива  
 $\rho$  – плотность топлива  
 $C_p$  – изобарная теплоемкость топлива  
 $\theta$  – температурный фактор:  $(\theta = T_w/T_f)$   
 $W$  – скорость течения

## ИНДЕКСЫ

w – стенка  
 f – поток

## ЛИТЕРАТУРА

1. The Demonstrator of Technologies – Dual Mode Scramjet on Hydrocarbon Endothermic Fuel/ Yu. M. Shikman, V.A. Vinogradov, L.S. Yanovski, etc. // AIAA 2001 – 1787. 10<sup>th</sup> International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Kyoto, Japan, April, 2001.
2. Яновский Л.С., Иванов В.Ф., Галимов Ф.М., Сапгир Г.Б. Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях. Казань.- Абак, 1999, 284с.
3. Семенов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности – М., изд. АН СССР, 1958 г., 686с.
4. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М., Наука, 1986 г., 287 с.
5. Петухов Б.С. Вопросы теплообмена /избранные труды/ - М., Наука, 1987 г., 277 с.
6. Cooling with Supercritical Oxygen / Rousar D., Miller F. // AIAA paper, 1975, N 1248.
7. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно М. Прикладные нечеткие системы //М., Мир, 1993 г., 368с.