

2. Для случаев нагрева и охлаждения получены зависимости фактора Колборна (связанного с коэффициентом теплоотдачи матрицы) от параметров потока теплоносителя с учетом температурного фактора.
3. Результаты поверочного расчета с применением полученных зависимостей показали хорошее совпадение с численным экспериментом.

Литература

1. Dr. David Gordon Wilson Professor Emeritus, MIT Chief Scientist, Wilson TurboPower Inc. «The high efficiency of our multistage ceramic-bladed turbine design can produce an attractive economic return even in the absence of CHP».
2. Плотников Д.А. Разработка и исследование дисковых секционных регенераторов автотракторных ГТД. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 1981 г.
3. Лебедь Н. Исследование гидравлических и теплообменных характеристик теплопередающих поверхностей для вращающегося регенератора секционного типа. Научно-технический отчет, 1971 г.
4. Исследование роторного теплообменника малоразмерного регенеративного газотурбинного двигателя. Общероссийский н/т журнал "Полет" №1, 2005г., с.38-42. А.В. Костюков и др.
5. Расчет распределения температур в каркасе дискового роторного теплообменника при нестационарных граничных условиях. Общероссийский н/т журнал "Полет" №10, 2005г., с.14-18. А.В. Костюков и др.
6. Высокотемпературный роторный теплообменник для газотурбинных и героторных двигателей. Известия МГТУ "МАМИ" №2 (12), 2011г., с.23-26. А.В. Костюков и др.
7. Исследование системы охлаждения каркаса роторного теплообменника. Известия МГТУ "МАМИ" №2 (4), 2007г., с.61-65. А.В. Костюков и др.
8. Алексеев Р.А., Костюков А.В. Повышение эффективности роторного теплообменника малоразмерного газотурбинного двигателя. Известия МГТУ "МАМИ" №1 (13), 2012 г., с.52-58.
9. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Н.Б. Варгафтик, 1972г.

Исследование режимов горения энергоаккумулирующих веществ

к.т.н. проф. Костюков А.В., доц. Кузнецов В.В., доц. Ащеульников Е.К., Родькин К.П.

Университет машиностроения

kostukov123@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются модель горения порошкообразных энергоаккумулирующих веществ (ЭАВ) в цилиндрической камере сгорания. Такая камера может рассматриваться как форкамера водородного реактора для транспортных и стационарных энергоустановок на базе ГТД. Составлена программа расчета горения порошкообразных ЭАВ в потоке перегретого водяного пара. Получено распределение температуры по оси камеры при различных значениях коэффициента избытка окислителя – водяного пара. Определены размеры глубины фронта пламени при заданных условиях работы камеры сгорания на энергоаккумулирующих веществах.

Ключевые слова: энергоаккумулирующие вещества, модель горения в цилиндрической камере сгорания

Продолжаются поисковые работы по использованию альтернативных источников энергии, среди которых первое место отводится новым методам получения водорода. Разработка новых методов получения водорода из воды играет важную роль в современной науке и технике, поскольку в отличие от органического топлива запасы воды являются неограниченными и возобновляемыми. В нашей стране и за рубежом разрабатываются методы получения водорода из воды с помощью энергоаккумулирующих веществ (ЭАВ) на основе алюминия и

кремния, что представляет новое направление на транспорте, в энергетике и в технологии, основанное на применении ЭАВ [1, 2, 3, 4, 5, 8].

При изучении режимов горения порошкообразных энергоаккумулирующих веществ в потоке перегретого водяного пара большой интерес представляет распределение температуры по оси цилиндрической камеры сгорания. Имеется в виду форкамера водородного реактора. В данной форкамере осуществляется предварительный подогрев порошкообразных энергоаккумулирующих веществ перед подачей их в рабочую зону водородного реактора.

Для обеспечения равномерного состава рабочей смеси – порошка ЭАВ и перегретого водяного пара – перед камерой сгорания устанавливается камера смешения. В камеру смешения осецентрично шнековым питателем подаётся порошок ЭАВ при комнатной температуре и тангенциально – перегретый водяной пар, имеющий температуру порядка 500°C. Образующаяся рабочая газовзвесь с температурой около 300°C направляется в камеру сгорания. Эта схема принята за основу при разработке программы расчёта осевого распределения температуры рабочего тела по оси камеры сгорания.

Определение осевого распределения температуры в камере сгорания даёт возможность рассчитать систему охлаждения камеры и тепловой барьер, отсекающий горячую камеру от блока питания. В блок питания входит расходный бункер с порошком ЭАВ и приводными электродвигателями для шнекового подающего устройства и для бункерного перемешивающего устройства. Перегрев этих объектов нежелателен.

При изучении режимов горения порошкообразных энергоаккумулирующих веществ в потоке перегретого водяного пара большой интерес представляет распределение температуры по оси цилиндрической камеры сгорания. Имеется в виду форкамера водородного реактора. В данной форкамере осуществляется предварительный подогрев порошкообразных энергоаккумулирующих веществ перед подачей их в рабочую зону водородного реактора.

Разработка программы расчета распределения температуры в камере сгорания

Для решения этой задачи использовалась упрощённая модель плоского одномерного неадиабатического пламени [6]. Рассматривается стационарное распределение температуры. Предполагается, что это распределение описывается уравнением:

$$\lambda \cdot \frac{d^2T}{dx^2} - m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dx} = -\omega \cdot q^o + L, \quad (1)$$

где: x – координата по нормали к фронту пламени, м;

T – температура реагирующей смеси, К;

λ – среднее значение коэффициента теплопроводности массы реагирующей смеси, Вт/(м·К);

m – поток массы реагирующей смеси через единицу площади в направлении оси x , кг/(м²·с);

c_p – средняя удельная теплоемкость реагирующей смеси при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

ω – скорость химической реакции, кг_{ЭАВ}/(м³·с);

q^o – тепловой эффект реакции, Дж/кг_{ЭАВ};

L – тепловые потери из единицы объёма реагирующей смеси в единицу времени, Вт/м³.

Здесь выбрана система координат, в которой пламя покоится, а рабочий поток движется слева направо через неподвижный фронт пламени. За начало координат принято положение фронта пламени. Перед пламенем скорость реакции $\omega = 0$ вплоть до точки $x = 0$. Зона реакции занимает область $0 \leq x \leq l$, здесь скорость реакции $\omega = \omega^o$. За пламенем, т.е. при $x > l$ снова $\omega = 0$.

Таким образом,

$$\omega = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \omega^o, & 0 \leq x \leq l. \\ 0, & x > l \end{cases} \quad (2)$$

Температура воспламенения рабочей смеси обозначается T_i .

Толщина зоны горения l определяется из уравнения:

$$q^\circ \cdot \omega^\circ \cdot l = q \cdot m, \quad (3)$$

в котором величина q , зависящая от начального состава рабочей смеси, равна полному тепловыделению, отнесённому к единице массы смеси, $[q]$ Дж/кг_{смеси}.

Левая и правая части уравнения (3) представляют собой два различных выражения для полного тепловыделения при горении, отнесённого к единице площади поверхности фронта пламени.

Уравнение (1) может быть проинтегрировано, если задана явная линейная зависимость величины тепловых потерь L от температуры T . Можно принять, что всюду в пламени:

$$L = K \cdot (T - T_o), \quad (4)$$

где: K – константа теплообмена, связанная с теплоотдачей от рабочей смеси к стенке трубы камеры сгорания, Вт/(м³·К); T_o – температура стенки трубы, К.

Формула (4) описывает тепловые потери, определяемые теплопроводностью и конвекцией от рабочей смеси к стенкам трубы, на которых поддерживается постоянная температура, равная начальной температуре T_o . Тепловые потери, связанные с излучением, определяются нелинейной температурной зависимостью, что препятствует получению аналитического решения. В данной работе, для упрощения, потери на излучение не учитываются.

Константа теплообмена K для круглой трубы предлагается определять по формуле:

$$K = \frac{15 \cdot \lambda}{D^2}, \quad (5)$$

где: λ – среднее значение коэффициента теплопроводности массы реагирующей смеси, Вт/(м·К); D – диаметр трубы камеры сгорания, м.

После подстановки выражений (2) и (5) в уравнение (1) последнее становится линейным уравнением и может быть проинтегрировано. Общее решение уравнения (1) имеет вид:

$$T - T_o - \frac{\omega \cdot q^\circ}{K} = A \cdot e^{\alpha_+ \cdot x} + B \cdot e^{\alpha_- \cdot x}, \quad (6)$$

где:

$$\alpha_{\pm} \equiv \frac{m \cdot c_p}{2 \cdot \lambda} \cdot \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{4 \cdot K \cdot \lambda}{m^2 \cdot c_p^2}} \right), \quad (7)$$

а величины A , B и ω имеют различные значения в каждой из трёх областей по оси камеры сгорания: перед фронтом пламени, в зоне горения и за зоной горения. Анализ уравнений (6) и (7) показывает, что

В области $x < 0$:

величина $B = 0$, поскольку при $x \rightarrow -\infty$ температура рабочей среды стремится к конечному пределу $T \rightarrow T_o$, а $\omega = 0$; при $x = 0$ имеем $T = T_i$ и величина $A = T_i - T_o$. Следовательно в области $x < 0$:

$$T - T_o = (T_i - T_o) \cdot e^{\alpha_+ \cdot x}. \quad (8)$$

В области $x > l$:

Величина $A = 0$, поскольку при $x \rightarrow \infty$ температура рабочей среды стремится к конечному пределу, а $\omega = 0$; при $x = l$ имеем $T = T_{\max}$ и величина $A = T_{\max} - T_o$. Следовательно в области $x > l$:

$$T - T_o = (T_{\max} - T_o) \cdot e^{\alpha_- \cdot (x-l)}. \quad (9)$$

В области $0 \leq x \leq l$:

Скорость реакции $\omega = \omega^\circ$. Формула (6) для этой области принимает вид:

$$T - T_o = A \cdot e^{\alpha_+ \cdot x} + B \cdot e^{\alpha_- \cdot x} + \frac{\omega \cdot q^\circ}{K}, \quad (10)$$

где: A и B – константы, которые для данной области определяются из условий непрерывности температуры T и градиента температуры dT/dx в точках $x = 0$ и $x = l$.

Для определения A , B и T_{\max} при указанных условиях получены 4 уравнения:

$$T_i - T_o = A + B + \frac{q \cdot m}{l \cdot K}, \quad (11)$$

$$T_{\max} - T_o = A \cdot e^{\alpha_+ \cdot x} + B \cdot e^{\alpha_- \cdot l} + \frac{q \cdot m}{l \cdot K}, \quad (12)$$

$$\alpha_+ \cdot (T_{\max} - T_o) = A \cdot \alpha_+ + B \cdot \alpha_-, \quad (13)$$

$$\alpha_- \cdot (T_{\max} - T_o) = A \cdot \alpha_+ \cdot e^{\alpha_+ \cdot l} + B \cdot \alpha_- \cdot e^{\alpha_- \cdot l}. \quad (14)$$

Исключая A , B и T_{\max} из уравнений (11), (12), (13) и (14), получаем уравнение для определения массовой скорости горения m :

$$\left(\frac{l \cdot K}{q \cdot m} \right) \cdot (T_i - T_o) = \left(\frac{-\alpha_-}{\alpha_+ - \alpha_-} \right) \cdot (1 - e^{-\alpha_+ \cdot l}). \quad (15)$$

Если ввести безразмерные параметры:

$$k \equiv \frac{K \cdot l}{c_p \cdot m}, \quad (16)$$

$$\tau \equiv \frac{c_p}{q} \cdot (T_i - T_o), \quad (17)$$

$$\mu \equiv \sqrt{\frac{m \cdot c_p \cdot l}{\lambda}}, \quad (18)$$

то с учётом выражения (7) можно преобразовать уравнение (15) в:

$$k \cdot \tau_i = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 4 \cdot \frac{k}{\mu^2}}} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\mu^2}{2} \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{k}{\mu^2}}} \right). \quad (19)$$

Если с помощью формулы (3) преобразовать формулу (16), исключив из неё неизвестную m , то параметр k можно представить в виде:

$$k = \frac{K \cdot q}{c_p \cdot q^o \cdot \omega^o}, \quad (20)$$

который можно рассчитать по заданным условиям задачи.

С помощью той же формулы (3) можно представить выражение (18) в виде:

$$\mu = m \cdot \sqrt{\frac{c_p \cdot q}{\lambda \cdot q^o \cdot \omega^o}}. \quad (21)$$

Расчёт распределения температуры в камере сгорания

Таким образом, при определённых по начальным условиям значениям k и τ , получаем нелинейное алгебраическое уравнение (19) с одним неизвестным μ , содержащим искомый параметр m .

Для дальнейших расчётов приняты следующие параметры задачи: $T_o = 573$ К (300 °С) – начальная температура рабочей смеси; $T_i = 1200$ К – температура самовоспламенения расчётных частиц алюминия [1]; $D = 0,04$ м – диаметр жаровой трубы камеры сгорания; $\lambda = 0,0615$ Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности водяного пара; $q^o = 9,53 \cdot 10^6$ Дж/кг – теплота сгорания ЭАВ (алюминиевый порошок АСД-4) в среде перегретого водяного пара [1]; q

$= 4,765 \cdot 10^6$ Дж/кг – теплота сгорания ЭАВ, отнесённая к 1 кг рабочей смеси (стехиометрическое соотношение весовых количеств алюминия и воды составляет 1 : 1); $c_p = 1655$ Дж/(кг·К) – удельная теплоёмкость рабочей смеси при постоянном давлении; $\omega^o = 1,52$ кг/(м³·с) – скорость химической реакции горения порошка алюминия в перегретом водяном паре.

Из работы [7] известно, что время гарантированного воспламенения и полного сгорания расчётной частицы алюминия диаметром 10 мкм составляет $t_{ox} = 123,05$ мс. В работе [6] приводится связь между скоростью химической реакции и временем реакции при известных плотности набегающей рабочей смеси $\rho_{см}$ и массовой доли горючего компонента – ЭАВ – $g_{ЭАВ}$:

$$t_{ox} = \frac{\rho_{см} \cdot g_{ЭАВ}}{\omega^o} \quad (22)$$

Здесь $\rho_{см} \approx (\rho_{ЭАВ} + \rho_{нар}) = (0,187 + 0,187) = 0,374$ кг/м³ и $g_{ЭАВ} = 0,5$.

Тогда скорость химической реакции

$$\omega^o = \frac{0,374 \cdot 0,5}{0,123} = 1,52 \text{ кг/(м}^3\text{·с)}.$$

Расчёты проводили с помощью Mathcad 14, используя вычислительный блок Given/Find и вычислительную функцию Isolve. Полученное распределение температуры по оси камеры в различных областях представлено на рисунках 1-3.

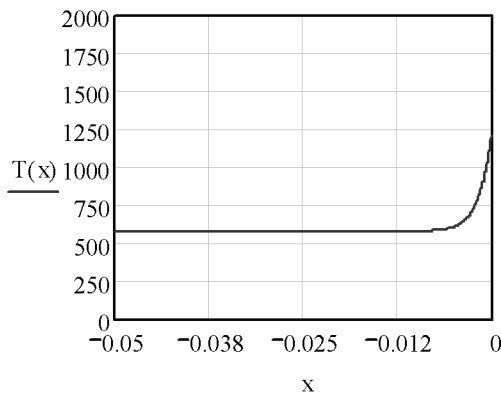


Рисунок 1 – Распределение температуры рабочей смеси перед фронтом пламени

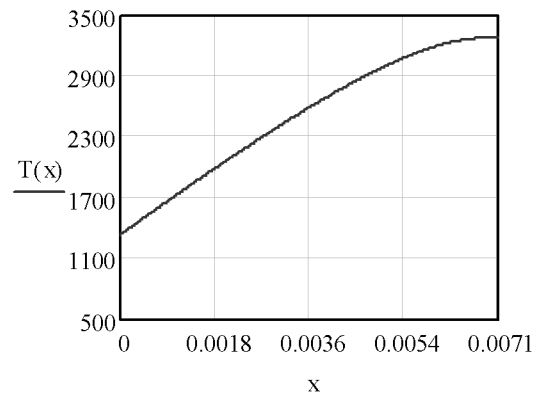


Рисунок 2 – Распределение температуры в зоне горения ЭАВ

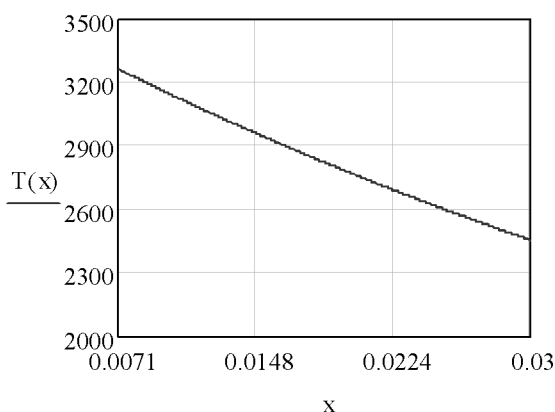


Рисунок 3 – Распределение температуры позади зоны горения ЭАВ

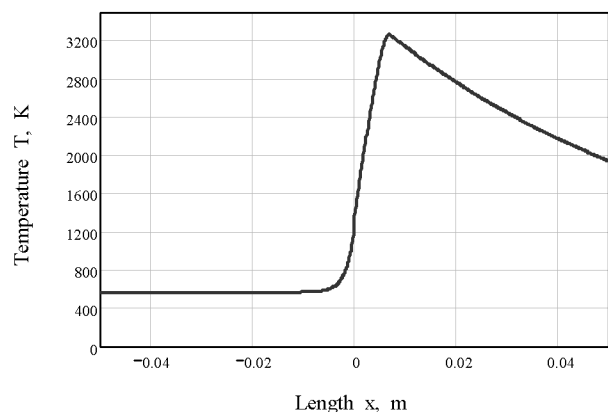


Рисунок 4 – Осевое распределение температуры в модели камеры сгорания

На рисунке 4 представлено интегральное распределение температуры по оси модели камеры сгорания: Координата x представлена в метрах, температура – в Кельвинах.

Аналогично были выполнены расчёты по этой программе для определения распределения температуры в камере сгорания при других значениях коэффициента окислителя (перегретого водяного пара).

На рисунке 5 показано интегральное распределение температуры по оси модели камеры сгорания для различных значений избытка окислителя α : $T(x)$ при $\alpha=1,0$; $T1(x)$ при $\alpha=2,0$; $T2(x)$ при $\alpha=3,0$.

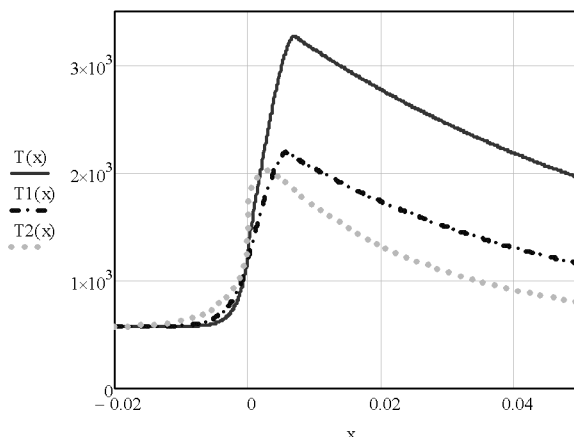


Рисунок 5 – Осевое распределение температуры в модели камеры сгорания при различных значениях α

Очевидно снижение максимальной температуры и сокращение длины зоны горения ЭАВ в потоке перегретого водяного пара при увеличении коэффициента избытка окислителя в камере сгорания. Результаты будут использованы при дальнейшем совершенствовании форкамеры сгорания водородного реактора.

Разработанная программа дала возможность рассчитать распределение температуры в цилиндрической камере сгорания, работающей на энергоаккумулирующих веществах. Максимальная расчётная температура горения порошкообразного ЭАВ (алюминий АСД-1) составила 3263К, что примерно отвечает известной теоретической адиабатной температуре для горения алюминиевого порошка в среде перегретого водяного пара [3].

Полученное распределение температуры даст возможность организовать требуемое внешнее охлаждение камеры сгорания.

Литература

1. Варшавский И.Л. Энергоаккумулирующие вещества и их использование. – Киев: Наук. думка, 1980. – 240 с.
2. Кузнецов В.В., Кустарев Ю.С. Энергоаккумулирующие вещества как топливо для АГТД. / Автомобильная промышленность, 2000, №. 5. – С. 34.
3. Кустарев Ю.С., Кузнецов В.В., Родькин К.П. Газопламенное нанесение покрытий с использованием энергоаккумулирующих веществ. / Автомобильная промышленность, 2001, № 8. – С. 20-21.
4. Кустарев Ю.С., Кузнецов В.В. и др. Применение энергоаккумулирующих веществ в качестве альтернативного топлива для газотурбинных установок / Известия МГТУ «МАМИ» № 1(5), 2008. – С. 62-66.
5. Кустарев Ю.С., Кузнецов В.В. Энергоаккумулирующие вещества как альтернативное топливо для ГТД. / Известия МГТУ «МАМИ» № 1(9), 2010. – С. 22-25.
6. Вильямс Ф.А. Теория горения. Пер с англ. – М.: Наука, 1971. – 616 с.
7. Авдеев К.А., Фролов Ф.С., Фролов С.М. Окисление мелкодисперсных частиц алюминия в среде перегретого водяного пара // Горение и взрыв, Вып.3, 2010. – С. 110-117.
8. Кузнецов В.В. и др. Разработка системы питания энергоустановки на базе ГТД, работающей на энергоаккумулирующих веществах / Материалы 77-й Международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России. Приоритеты развития и подготовка кадров», М. МГТУ «МАМИ», 27-28 марта 2012. – С. 142-146.