

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДПЛАМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ СУСПЕНЗИОННЫХ ГОРЮЧИХ

Мусалам Алаа, аспирант (Палестина), Р.А. Кучмамбетов, аспирант,

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков, Украина

Общая постановка проблемы и её связь с научно-практическими задачами. Перевод современных парогенераторов, работающих на мазуте и газе на сжигания композитных суспензионных горючих (КСГ), а именно пылеугольно-мазутных суспензий (ПУМС) экономически выгодно. Их использование, приготовление, хранение и сжигание аналогично основному топливу. В Украине проблема замещения жидких углеводородных горючих углем особенно актуальна в силу острого дефицита нефтяных ресурсов.

Практический интерес с точки зрения организации процесса сжигания КСГ представляет также возможность введения в их состав веществ – активаторов с целью управления стадийностью процесса. В качестве вещества активатора рассматривается вода [1].

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. Ранее были изучены свойства КСГ в предпламенных процессах [2]. Предлагались технологии сжигания ПУМС без использования веществ активаторов. В исследованиях на основании обзора публикаций использовалась суспензия на основе сертифицированного печного топлива (ПТ) ($C_{0,946}H_{1,161}O_{0,002}$ $A^d \cong 0,02$ % [зольность], $V^{daf} \cong 98$ % [выход летучих веществ] и мазута ($C_{0,875}H_{0,125}O_{0,005}$ $A^d \cong 0,14$ %, $V^{daf} \cong 98$ %) с добавлением мелкодисперсной угольной пыли ($C_{0,838}H_{0,056}N_{0,015}O_{0,077}S_{0,014}$, $A^d \cong 19$ %, $V^{daf} \cong 42$ %).

Цель исследований. Целью исследований являлось изучение физических свойств КСГ в процессах горения для дальнейшего численного моделирования.

Результаты исследований. Изучены особенности процесса горения композитных суспензионных горючих. Эксперимент проводился в два этапа.

Первый этап – горение образцов малого объема на термометрической установке.

Второй этап – горение смесей КСГ, объемом до

нескольких литров, на экспериментальной камере сгорания, основные элементы которой: газодводяной теплообменник; система топливоподдачи; система поддачи воздуха в камеру сгорания.

Термопары типа ХК установлены на входе и выходе камеры сгорания, на входе и выходе воды в газодводяной теплообменник.

По измеренным температурам методом теплового баланса определялись коэффициенты полноты сгорания исследуемых составов КСГ.

В ходе первого этапа проводились исследования по определению температуры процесса горения КСГ массой 125 мг. Образцы взвешивались до начала эксперимента и после для определения сухого остатка (зола). После взвешивания бюксу с образцом КСГ помещали над источником огня. Термопара устанавливалась над поверхностью образца. Сигнал с термопары поступал на самопишущий прибор, фиксирующий на бумаге значение температуры по времени, характерное значению времени $\tau^* = 6$ с.

Эксперименты проводились ПУМС с содержанием 10 % угольной пыли и различным содержанием воды. Установлено, что процесс протекает в три стадии:

1. Горение легких углеводородов, содержащихся в мазуте (рис. 1.).
2. Горение тяжелых углеводородов, содержащихся в мазуте (рис. 2.).
3. Горение угольной пыли (рис. 3.).

Результаты экспериментов показали, что увеличение содержания воды в ПУМС до 30 % увеличивает температуру процесса горения.

Эксперименты над КСГ на основе ПТ с содержанием 10 % “угольной пыли” и различным содержанием воды показали, что процесс также протекает в три стадии:

1. Горение легких углеводородов, содержащихся в ПТ (рис. 4.)

2. Горение тяжелых углеводородов, содержащихся в ПТ (рис. 5.)

3. Горение угольной пыли (рис. 6.).

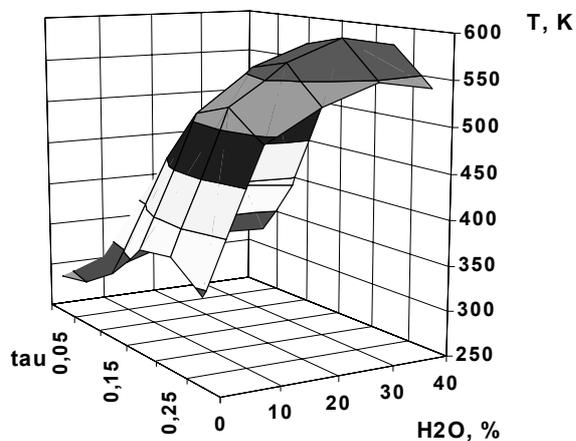


Рис. 1. Первая стадия горения ПУМС

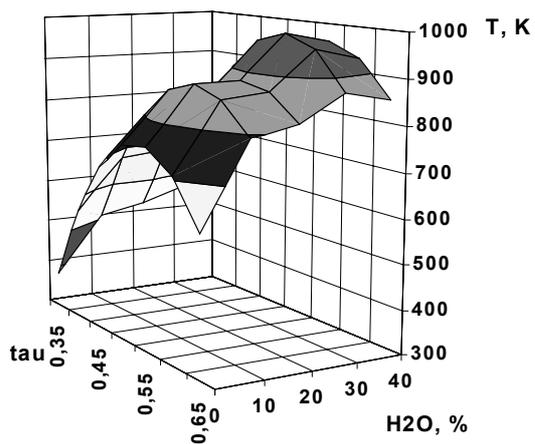


Рис. 2. Вторая стадия горения ПУМС

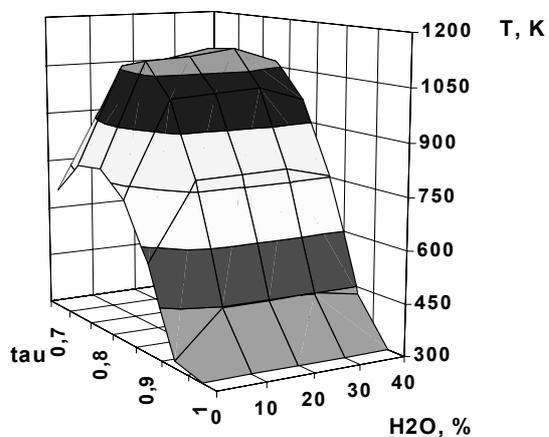


Рис. 3. Третья стадия горения ПУМС

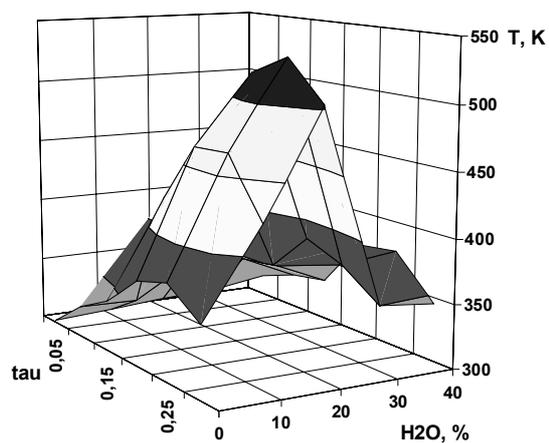


Рис. 4. Первая стадия горения КСГ

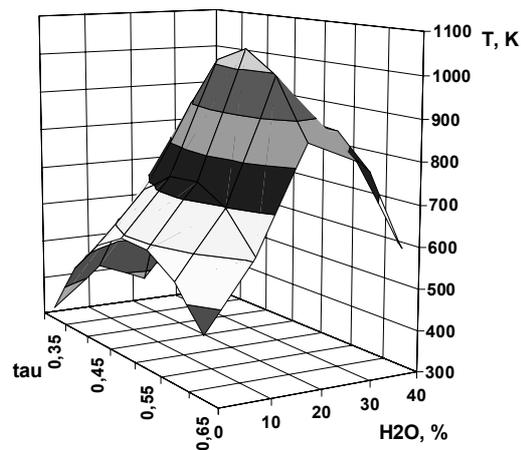


Рис. 5. Вторая стадия горения КСГ

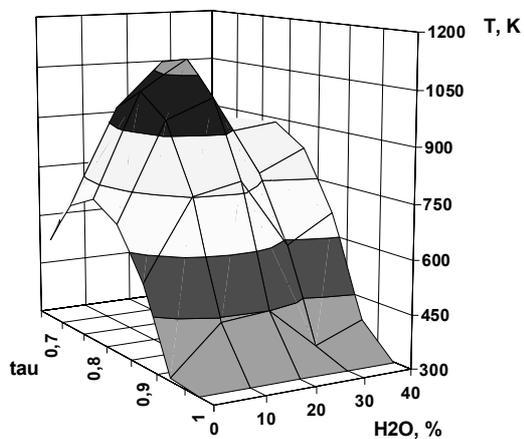


Рис. 6. Третья стадия горения КСГ

Результаты показали, что увеличение содержания воды до 20 % увеличивает температуру процесса горения.

На втором этапе исследований определены температуры процесса горения КСГ в камере сгорания с расходом топлива до 0.002 кг/с. Приготовленное топливо помещалось во второй бак системы подачи топ-

лива. Первичный разогрев камеры сгорания осуществлялся на дизельном топливе (ДТ), находящемся в первом баке. После разогрева камеры постепенно прекрывалась подача ДТ и открывалась подача КСГ. При установлении стабильного режима горения снимались показания температур по газу и воде.

Получена зависимость температуры горения КСГ на основе ПТ от добавок воды и угольной пыли. Результаты представлены на рис. 7.

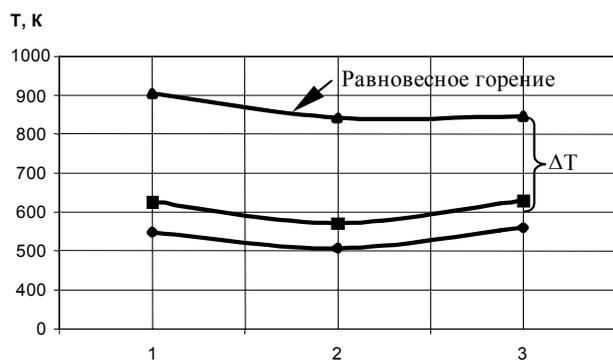


Рис. 7. Влияние добавок воды и угольной пыли на температуру горения

1 - 100% ПТ, 2 - 80% ПТ+20%H₂O,
3 - 70% ПТ+10% угля+20%H₂O

Также получена зависимость температуры горения КСГ с различным содержанием ПТ и мазута от добавок воды и угольной пыли. Результаты представлены на рис. 8.

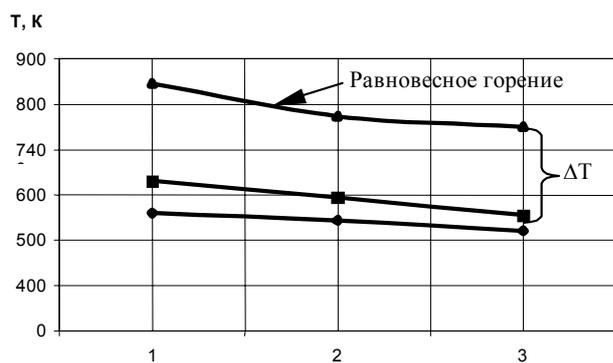


Рис. 8. Влияние состава основного жидкого топлива на температуру горения

1 - 60% ПТ+10% угля+30%H₂O,
2 - 30% ПТ+30% мазута+10% Угля+30%H₂O
3 - 60% мазута+10% угля+30%H₂O

С использованием SOFT ASTRA-4M проведен расчет равновесного состава продуктов сгорания всех экспериментальных составов КСГ в адиабатных усло-

виях. Сделано сравнение результатов расчета и экспериментальных данных. Результаты на рис. 7 и 8.

По известной методике проводился расчет коэффициента полноты сгорания. Результаты представлены на рис. 9.

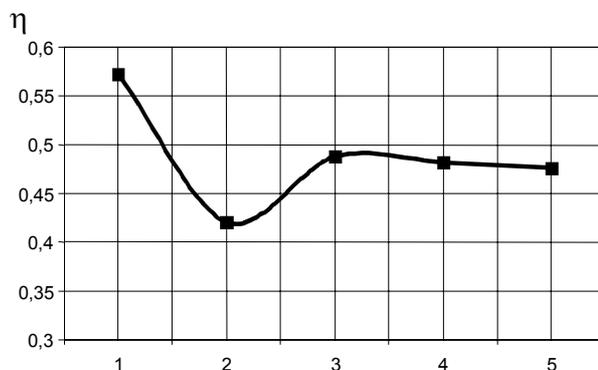


Рис. 9. Коэффициента полноты сгорания

1 - 100% ПТ, 2 - 80% ПТ+20%H₂O,
3 - 70% ПТ+10% угля+20%H₂O
4 - 30% ПТ+30% мазута+10% угля+30%H₂O
5 - 60% мазута+10% угля+30%H₂O

На базе физической модели [3] построена математическая модель предпламенного процесса эволюции капли суспензионного топлива, основанная на решении уравнений теплообмена в сопряженной постановке, т.е. одновременно для двух фаз: k – фазы (капля) и газообразной (окислитель, пары горючих компонентов топлива, нейтральные газы). Решалась сферически – симметричная задача в предположении гомобаричности процессов.

Для k – фазы имеют место следующие обстоятельства: капля нагревается за счёт конвективного теплообмена с газовой фазой и посредством излучения; конвективный перенос в капле пренебрежимо мал; процесс испарения равновесный. Тогда для описания процессов, происходящих в капле, правомерно использование двухтемпературной модели, основанной на гомогенизации, согласно которой температура усредняется по элементарным макрообъемам, значительно превосходящим размеры неоднородностей, достаточно малым по сравнению с размерами тела. При этом уравнение теплопроводности формулируется в пространстве, точками которого являются элементарные макрообъёмы.

Капля представлена зернистой структурой, состоящей из жидкой матрицы и твёрдых включений (частиц наполнителя) с характерным размером δ . Для такой системы использовались уравнения теплопроводности для средней температуры t и разности температур между фазами θ .

$$x_1 * c_1 * \rho_1 * \left(\frac{dt}{d\tau} + x_2 * \frac{d\theta}{d\tau} \right) = x_1 * f_1 - a_{\Phi} \theta; \quad (1)$$

$$x_2 * c_2 * \rho_2 * \left(\frac{dt}{d\tau} - x_1 * \frac{d\theta}{d\tau} \right) = x_2 * f_2 + a_{\Phi} \theta + \frac{1}{r^2} * \frac{d}{dr} * \left(r^2 * \lambda^* * \frac{dt}{dr} \right), \quad (2)$$

где $t = x_1 * t_1 + x_2 * t_2$; $\theta = t_1 - t_2$;

f – плотность внутренних источников теплоты;

λ^* – эффективный коэффициент теплопроводности гетерогенной системы;

x – объёмная доля компонента; индексы "1" и "2" относятся к частицам наполнителя f , ϵ и жидкого наполнителя соответственно,

a_{Φ} – коэффициент теплообмена между фазами.

Предполагалось, что при уменьшении радиуса капли сохраняются однородность и изотропность гетерогенной системы жидкая матрица – твёрдые включения. При этом функциями времени являются объёмная доля компонентов x и коэффициент теплообмена между фазами, вычисляемый по формуле:

$$a_{\Phi} = 7,746 * x_1 * x_2 * \frac{\lambda_1 * \lambda_2}{\lambda^* * \delta^2}. \quad (3)$$

Эффективный коэффициент теплопроводности λ^* определяется по соотношению

$$\lambda^* = \lambda_2 * \left[\frac{\lambda_1 + 2 * \lambda_2 - 2 * x_1 * (\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1 + 2 * \lambda_2 + x * (\lambda_2 - \lambda_1)} \right] \quad (4)$$

В газовой фазе использовались уравнения сохранения компонентов газовой фазы в приближении бинарной диффузии без учёта термодиффузии и конвективного переноса:

$$\rho_{\Gamma} * \left(\frac{dY_i}{d\tau} \right) = \frac{1}{r^2} * \frac{d}{dr} * \left(r^2 * \rho^2 * D * \frac{dY_i}{dr} \right) + W_i, \quad (5)$$

где i – число компонентов в газовой фазе, $i = 3$, Y_i – массовая доля i – го компонента; индексы "1" и "2" относятся к окислителю и парам жидкого компонента

соответственно; D – коэффициент бинарной диффузии; W_i – производство (убыль) i – го компонента за счёт химических реакций. Использовалась традиционная форма описания W_i :

$$W_1 = \rho_{\Gamma}^2 * Y_1 * Y_2 * A * \exp(-E / R * t);$$

$$W_2 = W_1 * L. \quad (6)$$

При записи уравнения энергии в газовой фазе принимали, что число Льюиса равно единице, конвективным переносом и теплообменом излучением пренебрегали:

$$\rho_{\Gamma} * \frac{dh}{d\tau} = \frac{1}{r^2} * \frac{d}{dr} * \left(r^2 * \rho_{\Gamma} * D * \frac{dh}{dr} \right) - \sum_{i=1}^N h_i^0 W_i, \quad (7)$$

где h – энтальпия смеси;

h_i^0 – энтальпия образования i – го компонента.

Система уравнений сохранения для газовой фазы замыкалась уравнениями состояния и калорическим:

$$P = \rho_{\Gamma} * R * t * \sum_{i=1}^N (Y_i / \mu_i); \quad (8)$$

$$h = C_{p_{\Gamma}} * t + \sum_{i=1}^N Y_i * h_i^0. \quad (9)$$

Система уравнений (1) – (9) решалась численно при начальных и граничных условиях.

На начальной стадии эволюции капли, когда расстояние между твёрдыми частицами наполнителя и гетерофазного активатора $r_a \geq \delta$, можно полагать, что испарение осуществляется с поверхности жидкой сферы радиусом r_0 . По мере испарения жидкой основы и уменьшения r_a увеличивается число твёрдых частиц, находящихся на поверхности капли, что эквивалентно уменьшению эффективной поверхности испарения. При этом осуществлялся переход к однотемпературной модели теплопроводности с использованием эффективных коэффициентов s , ρ , λ .

В математической модели использовалась добавка воды в суспензию, как вещества активатора. Добавка учитывается в теплофизических свойствах жидкого наполнителя.

Рассчитывались следующие величины:

1) объёмная доля – $x_2 = x_{ж.к.} + \ell$;

2) коэффициент теплопроводности –

$$\lambda_2 = \lambda_{ж.к.} * (1 - x_1 - \ell) + \lambda_{\ell} * \ell;$$

3) коэффициент теплоемкости –

$$c_{p2} = c_{pж.к} * (1 - x_1 - \ell) + c_{\ell} * \ell;$$

4) плотность –

$$\rho_2 = \rho_{ж.к} * (1 - x_1 - \ell) + \rho_{\ell} * \ell$$

5) энтальпия смеси в газовой фазе –

$$h_2 = h_{ж.к} * (1 - x_1 - \ell) + h_{\ell} * \ell.$$

ℓ – объёмная доля воды в суспензии.

По дифференциальным уравнениям, приведенным выше, с помощью конечно-разностного метода написана программа *activ.exe*.

Проведя расчеты, получена зависимость изменения массы капли ПУМС с различным содержанием воды и 10% содержанием угля по времени. Результат представлен на графике рис. 10.

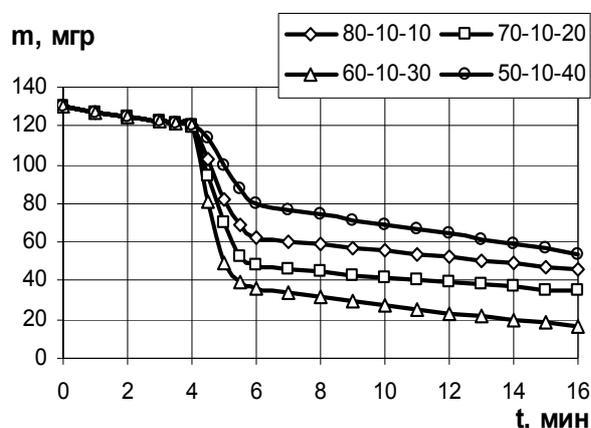


Рис. 10. Изменение массы ПУМС по времени

- 1 – 80 % мазута, 10 % угля и 10 % воды;
- 2 – 70 % мазута, 10 % угля и 20 % воды;
- 3 – 60 % мазута, 10 % угля и 30 % воды;
- 4 – 50 % мазута, 10 % угля и 40 % воды

Из полученных результатов расчета видно, что добавка 30 % воды максимально ускоряет процесс реакции.

Перспектива дальнейших исследований. В перспективе – рассмотрение процессов горения КСГ с применением различных активаторов. По созданной программе возможно проведение расчетов предпламенных процессов различных составов КСГ.

Выводы. Результаты экспериментов по горению КСГ показывают, что наблюдается трехстадийность процесса горения. Это обусловлено тем, что различна температура воспламенения содержащихся в КСГ веществ. Добавка воды значительно увеличивает скорость реакции до определенного процентного содер-

жания, для КСГ на основе ПТ – 20 % воды и на основе мазута – 30 % воды. После проведения экспериментов взвешивался остаток КСГ. Определено, что масса золы составляет 1...2 %. Это говорит о полном сгорании содержащегося образца КСГ с использованием активатора.

Из результатов проведенных экспериментов по горению КСГ на модельной камере сгорания видно, что имеет место качественное совпадение результатов экспериментов и расчетов. Разница объясняется не адиабатичностью процесса подвода тепла. Учет величины потерь приводит к количественному совпадению результатов с точностью до $\Delta T = 250$ К. Отслежен характер процесса горения при изменении состава КСГ.

Результаты численного моделирования качественно совпадают с результатами предыдущих экспериментальных исследований [2].

Таким образом, исходя из результатов проделанной работы, можно сказать, что использование КСГ в качестве топлива для теплогенерирующих установок экономически целесообразно и выгодно.

Литература

1. Бастеев А.В. Принцип активации и его применение в процессах энергопреобразования // Проблемы машиностроения.- 1993.- Вып. 39.- С. 81-87.
2. Бастеев А.В., Мусалам Алаа, Форфутдинов В.В. Экспериментальное определение процентного состава суспензионных горючих на основе печного топлива и мазута // Авиационно-космическая техника и технология: Сб.научн. тр.- Харьков: ХАИ, 2002.- Вып. 29.- С. 203-205.
3. Бастеев А.В., Соловей В.В. Радиационная активация процесса взаимодействия ПХА с водяным паром // Физика горения и взрыва.- 1990.- Т. 26.- № 3.- С. 36-40.

Поступила в редакцию 30.05.03

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Г.А. Горбенко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков; д-р техн. наук, проф. В.В. Соловей, ИПМаш НАНУ, г. Харьков.