

Т.А. Шарабура

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗИФИКАЦИИ И СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ЦИКЛОННОМ ПРЕДТОПКЕ

Аннотация. Приведена методика математического моделирования при использовании программного пакета "SigmaFlow", который позволяет описывать процессы аэродинамики и теплообмена при термической переработке топлив. При моделировании учтены особенности горения и газификации водоугольного топлива и использовались кинетические константы и значения энергий активации, наиболее полно описывающие реальный процесс переработки топлива. В результате моделирования процессов газификации и сжигания водоугольного топлива в циклонном предтопке с горизонтальной осью цилиндрических камер получены температурные поля и поля концентраций угольных частиц по сечению предтопка, а также составы продуктов термической переработки.

Ключевые слова: водоугольное топливо, программный пакет "SigmaFlow", термическая переработка, циклонный предтопок, температурное поле, концентрация веществ.

Введение

Украина располагает значительными запасами низкокалорийных углей, широкое и эффективное применение которых позволит значительно расширить энергетическую базу страны. Перспективным направлением применения низкокалорийных энергоносителей как топлива является получение на их основе водоугольного топлива, которое может быть использовано в различных энергетических агрегатах [1]. Поскольку водоугольное топливо является относительно новым видом топлива, а механизм его термической переработки отличается от переработки угля, то для эффективного использования водоугольного топлива в энергетике необходимо исследовать режимные параметры и основные закономерности процессов термической переработки с разработкой новых конструкций топочных агрегатов.

Современные топочные агрегаты отличаются большим разнообразием аэродинамических схем, а аэродинамика является одним из факторов, определяющих процессы горения и теплообмена в топочных устройствах. При проектировании и создании топочных устройств широко применяется математическое моделирование, основанное на физических законах, описывающих процессы аэродинамики и теплообмена.

Одним из программных пакетов, который эффективно описывает процессы аэродинамики и теплообмена в топочных устройствах, является пакет для численного моделирования “SigmaFlow” (Красноярский филиал института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия), который показал высокую точность при исследовании широкого класса гидродинамических и теплофизических процессов и оптимизации технологического оборудования объектов теплоэнергетики, гидроэнергетики и атомной энергетики [2-4].

Постановка задачи и цели исследования

Термическую переработку водоугольного топлива предлагается осуществлять в циклонном предтопке с горизонтальной осью цилиндрических камер. Циклонный предтопок состоит из камеры предварительной переработки, в которой происходит выход и горение летучих водоугольного топлива, и непосредственно камеры для сжигания или газификации. Данный предтопок имеет тангенциальную аэродинамическую схему движения теплоносителей. В предтопке предполагается использование поточной автотермической технологии в закрученном потоке, что обеспечивает высокую интенсивность процесса и высокую степень конверсии углерода [5].

Задачей данной работы является проведение исследований топочных процессов газификации и сжигания водоугольного топлива в циклонном предтопке при помощи математического моделирования в программном пакете “SigmaFlow” с учетом отличительных особенностей термической переработки водоугольного топлива.

Методика исследований и анализ полученных данных

При моделировании в программном пакете “SigmaFlow” предполагается, что течение газов является пространственным и турбулентным. Считается, что турбулентное течение, так же как и ламинарное, можно описать при помощи уравнения Навье-Стокса. В программе “SigmaFlow” в качестве модели турбулентности используется

стандартная k-ε модель, которая позволяет описывать достаточно широкий класс турбулентных течений, включающих как сдвиговую, так и гравитационную турбулентность и является моделью турбулентности первого уровня замыкания. Уравнения, описывающие данную модель, выглядят следующим образом:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{k}) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \nabla k \right) + P - \rho \varepsilon, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \cdot \varepsilon) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2)$$

где k - кинетическая энергия турбулентных пульсаций, ε - скорость диссипации турбулентности, \mathbf{v} - усредненное по времени поле скоростей, μ_t - турбулентная вязкость, μ - динамическая (молекулярная) вязкость, P - скорость генерации турбулентности, ∇k , $\nabla \varepsilon$, C_1 , C_2 - константы стандартной модели, которые согласно [6] составляют: $\nabla k=1,0$, $\nabla \varepsilon=1,3$, $C_1=1,44$, $C_2=1,92$.

Уравнение сохранения энергии рассматривается в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} h) = \nabla(\lambda \nabla T) + S_h, \quad (3)$$

где h - энтальпия многокомпонентной среды, λ - коэффициент теплопроводности, S_h - источниковый член, отвечающий за приток (отток) энергии в процессе химического реагирования, излучения, или каких-либо других процессах.

Свойства водоугольного топлива, такие как теплопроводность, плотность, удельная теплоемкость, энтальпия, динамическая вязкость молярная масса определяются через массовые доли его компонентов.

Уравнение переноса концентрации компонентов:

$$\frac{\partial \rho Y_m}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} Y_m) = \nabla(\rho D_m \nabla Y_m) + S_{Y_m} \quad (4)$$

$$m = 1 \dots N,$$

где Y_m - массовая доля m-той компоненты, D_m - коэффициент диффузии компонента m, S_{Y_m} - источниковый член, отвечающий за изменение компоненты в процессах химического реагирования или в каких-либо других процессах.

Вблизи стенок турбулентный поток имеет сложную структуру со значительными градиентами. Во внутренней области, занимающей

порядка 20% толщины пограничного слоя, генерируется около 80% всей энергии турбулентности. Для моделирования пристеночных течений применяется метод пристеночных функций, связывающий параметры течения с расстоянием до стенки, который представляет собой аналитическое решение упрощенных решений турбулентного течения. В основе упрощения лежат следующие предположения: локальное равновесие энергии турбулентных пульсаций (локальная скорость производства турбулентности уравнивается скоростью вязкой диссипации), постоянство касательного напряжения вдоль слоя, пренебрежимо малый градиент давления вдоль потока, локальная изотропность диссипирующих вихрей, универсальность профиля скорости (слабая зависимость от числа Рейнольдса).

Для решения уравнения переноса энергии используется широко известный метод контрольного объема, суть которого заключается в разбиении расчетной области на контрольные объемы (рис. 1) и интегрировании исходных уравнений сохранения по каждому контрольному объему для получения конечно разностных соотношений. Свойства метода достаточно подробно описаны в литературе [7,8]. В данном пакете используются многоблочные структурированные криволинейные сетки с исключаемыми областями.

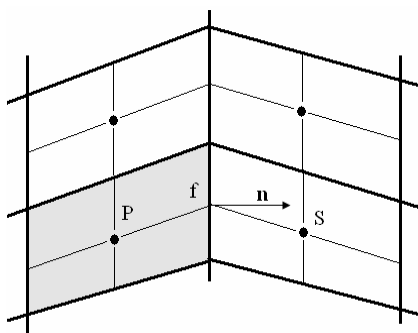


Рисунок 1 - К вычислению потоков через грань контрольного объема

Процесс теплообмена представляет собой сложное радиационно-конвективное взаимодействие между топочной средой и ограничивающими поверхностями в условиях значительной неизотермичности, сложной аэродинамики и горения топлива, многократного отражения и рассеяния селективного излучения. Высокий температурный уровень среды и поверхностей обуславливает преобладание радиационного теплообмена. В связи с этим при проведении теплового расчета

предъявляются повышенные требования к учету радиационной составляющей в суммарном теплообмене.

В данной работе для описания процессов движения топливных частиц используется метод Лагранжа. При моделировании движения частиц основными силами, воздействующими на частицу, являются сила межфазного взаимодействия (сила аэродинамического сопротивления) и сила тяжести.

Уравнение движения частицы записывается как:

$$\frac{dU_{ip}}{dt} = C_w A_p \frac{\rho}{2} U_r (U_i - U_{ip}) - \rho g_i, \quad (5)$$

где $C_w = \frac{24}{Re_p} f_k$, $Re_p = \frac{U_r d_p \rho}{\mu_{mol}}$, $U_r = \left(\sum_{i=1}^3 (U_i - U_{ip})^2 \right)^{1/2}$, d_p – диаметр частицы, U_i – i -ая компонента скорости газа, $U_i = \bar{U}_i - U_i'$, \bar{U}_i – средняя i -ая компонента скорости газа, U_i' – пульсационная составляющая скорости газа, U_{ip} – i -ая компонента скорости частицы, C_w – коэффициент сопротивления.

Коэффициент f_k для различных Re_p , можно записать следующим образом:

$$f_k = \begin{cases} 1, Re_p \ll 1 \\ 1 + 0,15 Re_p^{0,687}, Re_p \leq 1000 \\ 0,44 \left(\frac{Re_p}{24} \right), Re_p > 1000 \end{cases} \quad (6)$$

Учет турбулентности потока на движение частицы производится введением случайных флуктуаций скорости газа в уравнение движения для частиц.

Предполагается, что водоугольное топливо представляется дискретным набором частиц, которые подаются через форсунки в топочную камеру. Для моделирования процессов горения и газификации водоугольного топлива в программе “SigmaFlow” используется модифицированная диффузионно – кинетическая модель, которая представляется в виде последовательных этапов.

Первый этап заключается в прогреве и испарении влаги из топлива. При испарении влаги используется модель испарения отдельной капли, которая рассчитывается на основе значения количества водяного пара на поверхности частицы и в объеме:

$$N_i = k_c (C_{i,s} - C_{i,\infty}), \quad (7)$$

где N_i – молярный поток пара, k_c – коэффициент массопереноса, $C_{i,s}$ – концентрация пара на поверхности частицы, $C_{i,\infty}$ – концентрация пара в объеме.

После испарения влаги происходит распад частицы. Образовавшиеся после распада частицы выгорают по модели воспламенения и горения частицы угля [9,10]. А для описания процессов газификации водоугольного топлива в математической модели были реализованы реакции паровоздушной конверсии угля. Но при этом необходимо учитывать, что процесс горения водоугольного топлива отличается от горения угля [11,12] и, соответственно, отличаются значения кинетических констант и энергий активации. При исследовании процессов сжигания и газификации водоугольного топлива в предложенный программный пакет заложены дополнительные реакции и уточненные значения констант равновесия и энергий активации применительно к данному топливу [13-15]. Это позволило наиболее полно и приближенно к реальным условиям описать процессы горения и газификации водоугольного топлива.

В процессе выгорания частицы угля происходит уменьшение ее массы и диаметра, плотность частицы остается постоянной.

Изменение диаметра частицы за счет горения описывается уравнением

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{2}{\rho_k} K_s^c, \quad (8)$$

где ρ_k – плотность коксового остатка, K_s^c – скорость горения углерода.

Температура частицы определяется уравнением сохранения энергии

$$\frac{m_{\text{ч}} C_{\text{ч}} dT}{4\pi r_{\text{ч}}^2 dt} = \varepsilon \sigma (T_{\text{рад}}^4 - T_{\text{ч}}^4) + \alpha_{\text{конв}} (T_{\text{г}} - T_{\text{ч}}) + \frac{QH}{4\pi r_{\text{ч}}^2}, \quad (9)$$

где $C_{\text{ч}}$ – теплоемкость материала частицы, ε – степень черноты материала частицы, σ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $T_{\text{рад}}$ – температура излучающего объема, $T_{\text{ч}}$ – температура частицы, $\alpha_{\text{конв}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, Q – удельный тепловой эффект реакции.

Ослабление конвективного теплообмена, которое объясняется выходом паро- и газообразных веществ с поверхности угольных частиц водоугольного топлива при их разогреве, можно учитывать веде-

нием числа Нуссельта в зависимости от критерия Пекле внешнего омывания (Pe) и критерия Пекле газовыделения (\overline{Pe})

$$Nu = 2 + \frac{Pe}{2} - \frac{37}{960} Pe^2 - \frac{Pe\overline{Pe}}{4} - \frac{\overline{Pe}}{2}, \quad (10)$$

где $\overline{Pe} = \frac{w\delta}{a}$, (11)

где w - скорость выхода продуктов реакции и летучих.

Так как при горении углеродных частиц теплообмен с газовой средой протекает более интенсивно [16], то в математическую модель вводится коэффициент, учитывающий влияние процесса горения на конвективный теплообмен.

$$\alpha_{\text{конв}}^{\text{гор}} = \alpha_{\text{конв}} K_{\text{гор}}, \quad (12)$$

где $\alpha_{\text{конв}}^{\text{гор}}$ - эффективный коэффициент конвективного теплообмена между горящими угольными частицами и газом, $\alpha_{\text{конв}}$ - коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности частицы при отсутствии горения.

Известно [17], что коэффициент $K_{\text{гор}}$, учитывающий влияние процесса горения на конвективный теплообмен между частицами угольной пыли и газовой средой, в определенном интервале, мало зависят от размеров частицы и концентрации кислорода в газовой среде, и в интервале температур 1200-1600 К коэффициент $K_{\text{гор}}$ может быть записан в следующем виде:

$$K^{\text{гор}} = 145 e^{-\frac{5000}{T}}. \quad (13)$$

Программный пакет “SigmaFlow” позволяет получить температуры и концентрации газообразных компонентов и угольных частиц в центральном сечении и по длине каждой камеры, а также векторное поле скоростей для каждой камеры топочного устройства.

При моделировании процессов термической переработки водоугольного топлива предполагалось, что температура воздуха на входе в каждую камеру предтопка составляет 400°C, а температура топлива при подаче составляет 150°C. Подогрев энергоносителей на входе в предтопок осуществляется для достижения требуемого температурного уровня процессов термической переработки [18]. Расчеты производились применительно к водоугольному топливу из газового угля украинского месторождения с теплотой сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{р}}=15,1$ МДж/кг и содержанием твердой фазы 61,5%.

В результате вычислений на исследуемый объект (циклонный предтопок) накладывается расчетная сетка. Сеточная модель циклонного предтопка представлена на рис. 2.

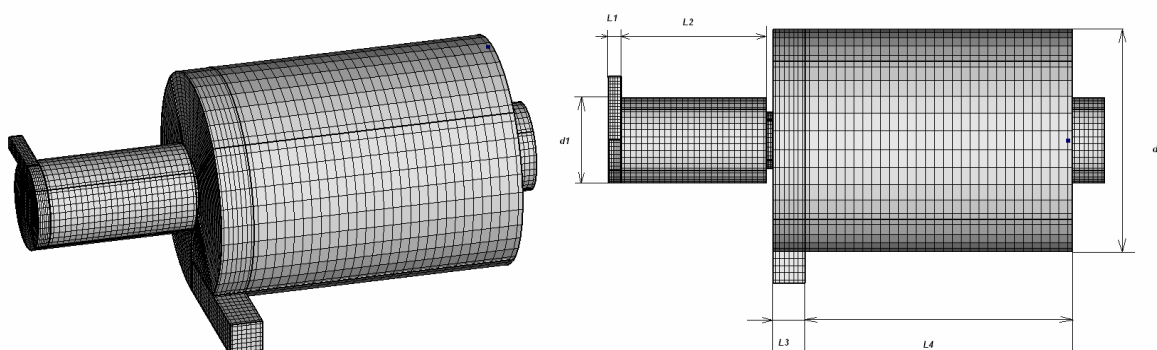


Рисунок 2 - Сеточная модель циклонного предтопка

При моделировании предполагается, что в качестве основных управляющих параметров для достижения требуемого состава продуктов термической переработки топлива принимается коэффициент расхода окислителя и температура процесса. Характеристики температурных полей по сечению циклонного предтопка представлены на рисунке 3.

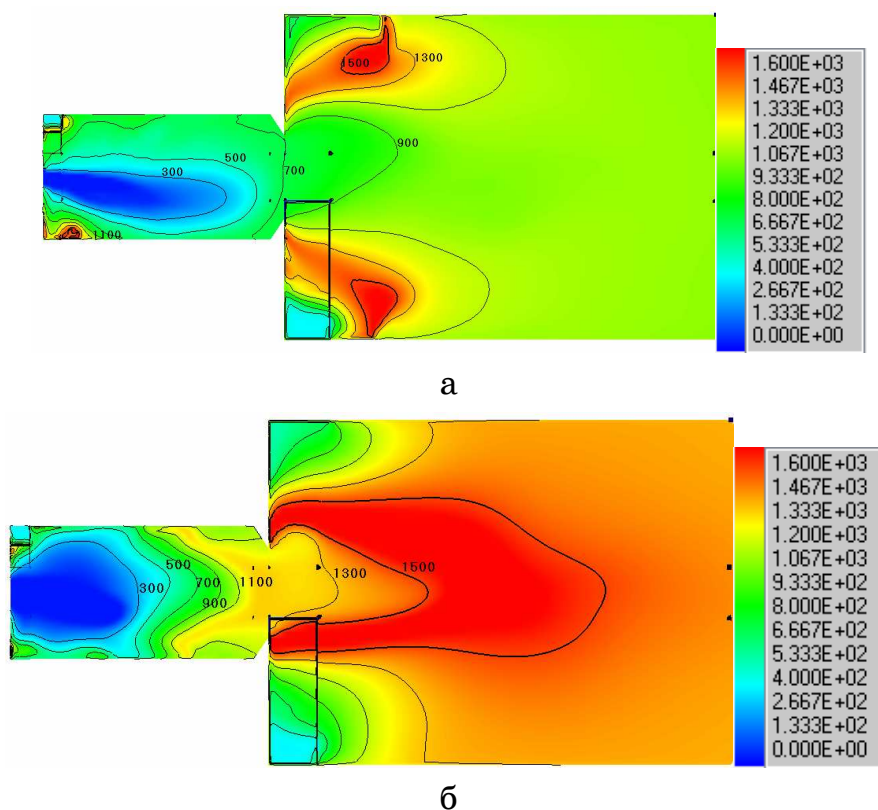


Рисунок 3 - Поле температур в центральном сечении при газификации (а) и горении (б) водоугольного топлива, °С

Как видно из полученных данных, при газификации водоугольного топлива температура в первой камере предтопка составляет 300-500 °С, что является достаточным условием для выхода и частичного горения летучих топлива. Во второй камере предтопка, где происходит догорание летучих и газификация топлива, уровень температур составляет порядка 900 °С.

При сжигании водоугольного топлива в первой камере предтопка происходит выход и горение летучих веществ и температура при этом составляет 900-1100 °С. Во второй камере наблюдается активное горение коксового остатка топлива, а температура достигает 1300-1500 °С. При этом важно, что поток продуктов горения водоугольного топлива по сечению циклонного предтопка на выходе имеет равномерную температуру.

Концентрация угольных частиц в по сечению циклонного предтопка при газификации и сжигании водоугольного топлива представлена на рис. 4

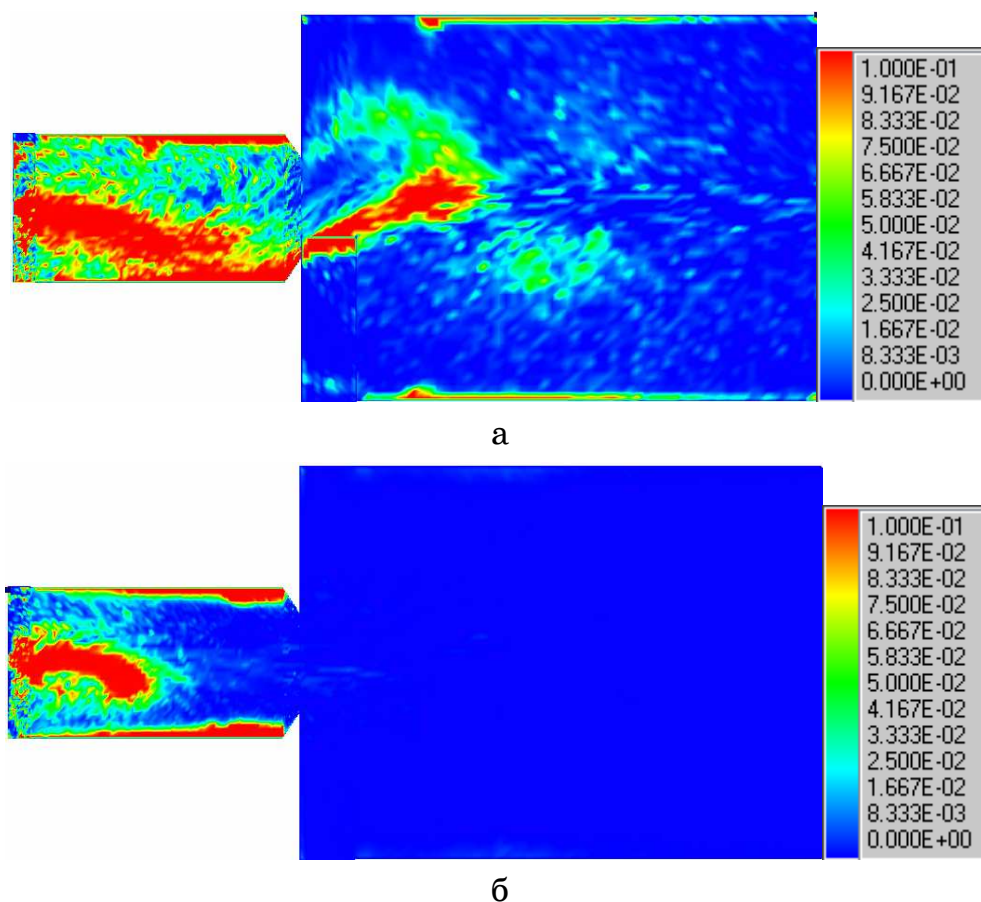


Рисунок 4 – Концентрация угольных частиц в центральном сечении предтопка при газификации (а) и горении (б) водоугольного топлива, кг/м³

Представленные результаты показывают, что при термической переработке водоугольного топлива в циклонном предтопке присутствует незначительный механический недожог топлива. При этом степень конверсии углерода при газификации водоугольного топлива составляет 90,8 %, а при сжигании она достигает 93,3 %. Эти показатели являются значительно выше, чем при термической переработке угольной пыли (83-87%).

Полученные при моделировании составы продуктов термической переработки на выходе из циклонного предтопка представлены в таблице 1.

Таблица 1

Состав продуктов термической переработки водоугольного топлива

| Состав продуктов переработки, % об. | Воздушная газификация | Сжигание |
|-------------------------------------|-----------------------|----------|
| CO | 14,1 | ~ 0 |
| H ₂ | 5,9 | ~ 0 |
| CO ₂ | 8,5 | 11,8 |
| H ₂ O | 16 | 16,5 |
| CH ₄ | 6,8 | ~ 0 |
| N ₂ | 48,7 | 66,2 |
| O ₂ | ~ 0 | 5,5 |

При газификации водоугольного топлива в циклонном предтопке образуется газ с содержанием 26,8% горючих компонентов, при этом теплота сгорания газа составляет 4,9 МДж/м³. При газификации топлива можно поддерживать такой расхода окислителя, который устанавливает необходимое соотношение восстановительных и окислительных компонентов в газе, определяемое технологией его использования.

При сжигании водоугольного топлива в циклонном предтопке состав продуктов горения свидетельствует о протекании реакций полного горения с образованием конечных продуктов CO₂ и H₂O.

Полученные результаты математического моделирования термической переработки водоугольного топлива в двухкамерном циклонном предтопке описывают процессы, происходящие в топочных устройствах такого типа, и могут быть использованы при создании предтопков для переработки водоугольного топлива.

Выводы

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что использование программного пакета “SigmaFlow” с учетом особенностей горения водоугольного топлива позволяет исследовать процессы

термической переработки водоугольного топлива в достаточно широком диапазоне.

Термическую переработку водоугольного топлива предлагается осуществлять в двухкамерном циклонном предтопке с горизонтальной осью цилиндрических камер с использованием поточной автотермической технологии в закрученном потоке.

Установлено, что процесс термической переработки водоугольного топлива в циклонном предтопке целесообразно проводить при подогреве воздуха до 400 °С и подогреве топлива до 150 °С, что обеспечивает необходимый температурный уровень процессов газификации (900-1000 °С) и горения (1300-1500 °С). При этом степень конверсии углерода при газификации водоугольного топлива составляет 90,8 %, а при сжигании она достигает 93,3 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А.С., Егурнов А.И., Борук С.Д. и др. Высококонцентрированные суспензии на основе отходов углеобогащения. Получение, реологические характеристики и энергетическая ценность // *Хімічна промисловість України*. - 2007. - №2 (79). - С. 56-60.
2. Чернецкий М.Ю., Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Суржикова Н.С. Модифицированная математическая модель для расчета факельного сжигания углей микропомола // *Материалы региональной научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий»*, 25-27 июня 2009г. – Томск. - С. 159-165.
3. Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А. Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании // *Физика горения и взрыва*. – 2011. - № 3. - С. 37-46.
4. Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Чернецкий М.Ю., Суржикова Н.С. Математическая модель процессов аэродинамики и теплообмена в пылеугольных топочных устройствах // *Тепловые процессы в технике*. – 2011. – Т.3. - №3. - С.140-144.
5. Пинчук В.А., Губинський М.В., Потапов Б.Б. Использование водоугольного топлива и продуктов его переработки в энергетике и металлургии // *Металургійна техніка: Збірка наукових праць Національної металургійної академії України*. - Дніпропетровськ: «Нова ідеологія». - 2008. - С. 221-227.

6. Launder B. E. and Spalding D. B. The Numerical Computation of Turbulent Flow // *Comp. Methods Appl. Mech. Eng.* - 1974. - Vol. 3. - P. 269–289.
7. Андерсон, Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. - М.: Мир, 1990..– 726 с.
8. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.
9. Виленский Т.В., Хзмалян Д. М. Динамика горения пылевидного топлива. – М.: Энергия, 1977. – 248 с.
10. Волков Э.П., Горячев В.Д., Гусев И.Н., Зайчик Л.И., Першуков В.А. Математическое моделирование топочных процессов в камерных топках при сжигании пылеугольного топлива // *Сибирский физико-технический журнал.* - 1991.– № 5. - С. 122–125.
11. Делягин Г.Н. Об условиях совместного протекания процессов испарения воды и выгорания капли водоугольной суспензии / *Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий.* - М.: Наука, 1967.- С. 55-67.
12. Делягин Г.Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха / *Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий.* - М.: Наука, 1967. - С. 45-55.
13. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива – М., 1958. – 598 с.
14. Померанцев Б.В, Арефьев К.И, Ахмедов Д.В. Основы практической теории горения – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
15. Палеев И.И., Юдин В.Ф. Взаимодействие водяного пара с углеродом топлива // *Газовая промышленность.* -1957. - № 5.
16. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва - М., 1957. – 442 с.
17. Бабий В.И. Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 209 с.
18. Шарабура Т.А, Пинчук В.А., Шевченко Г.Л.. Влияние температуры подогрева водоугольного топлива на его свойства и состав // *Металлургическая теплотехника: сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины.* – Выпуск 2(17). – Днепропетровск: Новая идеология, 2010. – С. 205-211.