УДК 621.182.9

ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИГАНИЯ НИЗКОКАЧЕСТВЕННОГО УГЛЯ

Якимова И.С., Фурсов И.Д., Жуков Е.Б.

Алтайский государственный технический университет им.И.И.Ползунова, Барнаул, Россия

АННОТАЦИЯ

Повышение цен на нефть и газ, а также значительно меньшие их запасы, по сравнению с запасами твердого топлива, делает все менее привлекательным использование газообразного и жидкого топлива на паровых и водогрейных котлах малой и средней мощности.

Существующие технологии сжигания низкосортных топлив имеют целый ряд недостатков, не позволяющих полностью использовать заложенную в них энергию. Применение в энергетике альтернативных видов топлив затруднено также и недостаточной изученностью свойств этих топлив и процессов при их сжигании в топочных устройствах.

Приведены результаты экспериментов по сжиганию одиночных частиц топлива. Предложена формула для вычисления времени стадий горения частиц топлива. Расчетные и экспериментальные данные использовались при численном моделировании аэродинамики топочных устройств при расчете необходимого времени нахождения горящей частицы в объеме топки до полного выгорания. Предлагаемую формулу можно использовать при расчетах подобных схем сжигания низкосортного топлива.

Уточнены значения следующих коэффициентов при сжигании в вихревой топке бурого угля Мунайского разреза: коэффициент тепловой эффективности экранов, коэффициент, учитывающий положение максимума температуры пламени, потери тепла от химической и механической неполноты сгорания топлива.

На основе анализа характеристик бурого угля Мунайского разреза приведены рекомендации по дальнейшему конструированию топочных устройств для его эффективного сжигания.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что 39 % из общего баланса твердого топлива Российской Федерации приходится на долю низкосортных бурых углей с теплотой сгорания не более 14 МДж/кг и влажностью до 40% и более. Такие угли малопригодны для сжигания в традиционных слоевых топках.

Существующие технологии сжигания низкосортных топлив имеют целый ряд недостатков, не позволяющих полностью использовать заложенную в них энергию. Применение в энергетике альтернативных видов топлив затруднено также и недостаточной изученностью свойств этих топлив и процессов при их сжигании в топочных устройствах.

Наиболее актуальной для Алтайского края в данном аспекте видится разработка и активное вовлечение в топливный баланс края бурого угля Мунайского разреза.

В Солтонском районе Алтайского края расположено буроугольное месторождение. Целесообразность его освоения подтверждают результаты разведочных работ, проведенных в 1986-2000 годах ОАО «Кузбассгипрошахт». По качеству уголь аналогичен углям, поставляемым из Канско-Ачинского бассейна Красноярского края. Высокая влажность бурых углей и большое содержание мелочи затрудняют их сжигание в слоевых котлах малой и средней мощности.

Кафедрой котло- и реакторостроения Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова разработана котельная установка, предназначенная для сжигания низкосортных видов топлива. В конструкцию агрегата заложен ряд принципов и устройств, позволяющих снизить расход металла, габариты конструкции и существенно повысить эксплуатационный КПД котла

© Якимова И.С., Фурсов И.Д., Жуков Е.Б.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В слоевых топках имеет место большой унос мелких частиц недогоревшего топлива. Проблему можно решить путем создания вихря в топке с целью удержания парусных частиц в активной зоне топочной камеры. Удержание частиц топлива в топке до их глубокого выгорания должно обеспечиваться за счет аэродинамики топки. Соответственно, целью расчетов должно являться как выявление общей картины аэродинамической обстановки, так и её детализация и выявление определяющих факторов по организации вихревого течения. Эти вопросы наиболее эффективно решаются при численном моделировании.

Для определения динамики термического разложения топлива проведены эксперименты по сжиганию одиночных частиц топлива, по которым определялись скорость выхода летучих из частицы, время сушки частицы, время выхода летучих и время горения углерода в топливе (рисунок 1). Эксперименты проводились с частицами массой 0,5...1,5 г при температурах 700...900°С. Из обработки результатов экспериментальных данных предложена ледующая формула для расчета времени выгорания угля Мунайского разреза:

$$m/m_0=(\alpha T-\beta)\cdot\ln(\tau)-\gamma\cdot T+\varepsilon,$$

где m_0 – начальная масса частицы, г;
m – текущая масса частицы, г;
T – температура, К;
τ – текущее время, с.

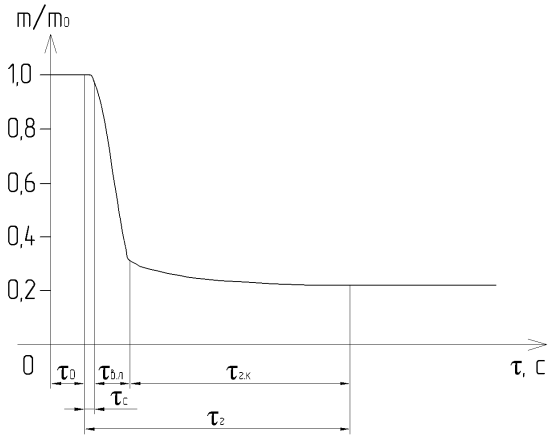

Рис.1 Динамика термического разложения топлива

Коэффициенты α, β, γ, ε рассчитываются по формулам, предложенным ниже:

$$\alpha=(-0{,}0002)\cdot m_0+0{,}001,$$

$$\beta=(0{,}1773)\ )\cdot m_0+0{,}393,$$

$$\gamma=(-0{,}0010)\ )\cdot m_0+0{,}002,$$

$$\varepsilon=(-0{,}9580)\ )\cdot m_0+2{,}607.$$

Все формулы также получены в результате анализа экспериментальных данных.

В настоящее время ведутся эксперименты для расчета коэффициентов для кородревесных отходов и отходов сельскохозяйственной промышленности.

С помощью полученных коэффициентов рассчитывается как полное время выгорания частицы, так и время отдельных стадий горения. Затем полученные расчетные и экспериментальные данные используются при численном моделировании аэродинамики топочных устройств при расчете необходимого времени нахождения горящей частицы в объеме топки до полного выгорания.

Исходя из анализа теплофизических характеристик угля Мунайского разреза, можно дать некоторые рекомендации по конструированию топочных устройств для его сжигания [1]:

- топочная камера должна обладать высокой теплоемкостью, чтобы обеспечить быструю сушку и термическое разложение топлива.
- частицы этого угля, как и его кокса, обладают высокой парусностью и легко выносятся из топки. Поэтому такая топка должна обладать высокими сепарационными свойствами, обеспечивающими более длительное пребывание частиц в камере горения.
- из-за невозможности стабильных поставок этого топлива в течение года, топочная камера должна обладать определенной универсальностью, пригодностью для сжигания в ней традиционных для слоевых топок топлив.
- Для удержания частиц внутри топочной камеры практически на всех слоевых котлах используется принцип гравитационной сепарации. Сила гравитации напрямую связана с плотностью вещества, и

при использовании в качестве топлива угля Мунайского разреза, такой вид сепарации малоэффективен.

Предложенный кафедрой котельный агрегат, имеет такой профиль топочной камеры (рисунок 2), в котором удержание частичек полифракционного топлива основывается на инерционном принципе сепарации, широко используемом в инерционных сепараторах систем пылеприготовления.

На основе полученных экспериментальных данных оптимизирован геометрический профиль топочной камеры, определена рациональная схема расположения сопел первичного и вторичного дутья.

Как показывают расчеты (рисунок 2) и результаты экспериментов на лабораторной установке, предложенный профиль топочной камеры с реализованным в нем принципом инерционной сепарации обеспечивает улавливание частиц топлива размером не менее 100 мкм.

Совместно с «ПроЭнергоМаш-Проект» разработан ряд проектов реконструкции котлов ДКВр-6,5-13ПМ (Чунский лесопромышленный комбинат) [2], ДЕ-10-14 ГМ (центральная котельная г.Браслав) [3], КВ-ГМ 10-150 (г.Миоры, котельная «Северная») [4].

При выполнении проектов использовалось математическое моделирование аэродинамики в топках котлов для определения направления острого дутья (рисунок 2) и эффективности сепарации частиц топлива в вихре (рисунки 3, 4) при различной организации дутья и профиля топочной камеры.

Схема сжигания - в вихревой топке с удержанием мелких частиц до практически полного выгорания над механизированной топкой с шурующей планкой. Используется факельно-слоевое сжигание с дожиганием уноса в потоке острого дутья. За счет глубокого выжигания горючих предлагаемый топочный процесс обеспечивает повышенную экономичность и высокие экологические показатели котла. Объединение слоевого и факельного сжигания обеспечивает взаимное поддержание горения и однородное заполнение всей топки факелом.

По результатам пусконаладочных работ котла ДЕ 10-14 ГМ дан ряд рекомендаций: установка ворошителя в бункер топлива, футеровка экранов топки для образования зажигательного пояса и другие. Эти рекомендации были приняты к сведению и исполнены. Котел вышел на режим, удалось добиться устойчивого горения и работы котла на расчетных параметрах. Теплопроизводительность котла при влажности топлива 48% составила 5 МВт (котел переведен в водогрейный режим), температура на выходе из топки 940°С, температура уходящих газов 185°С, температура воздуха после воздухоподогревателя 219°С.

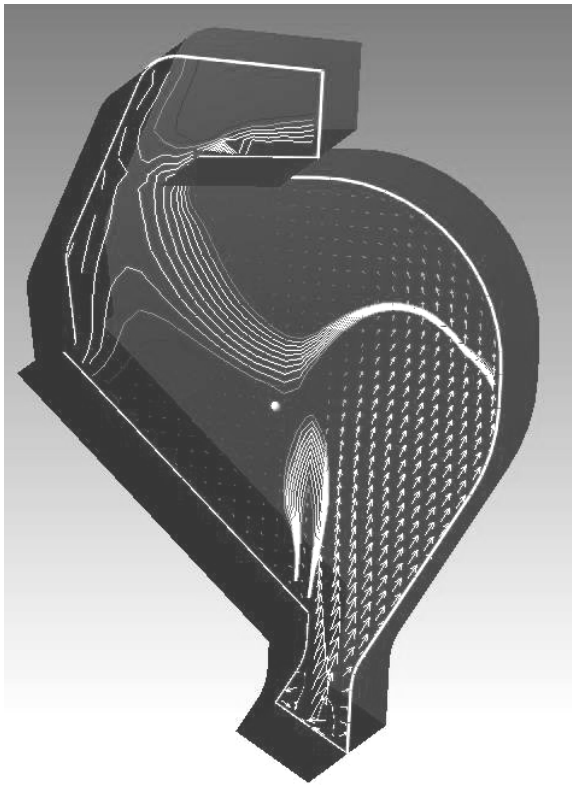

Рис.2 Линии тока при математическом моделировании аэродинамики в топке котла КВм-3,0КБ

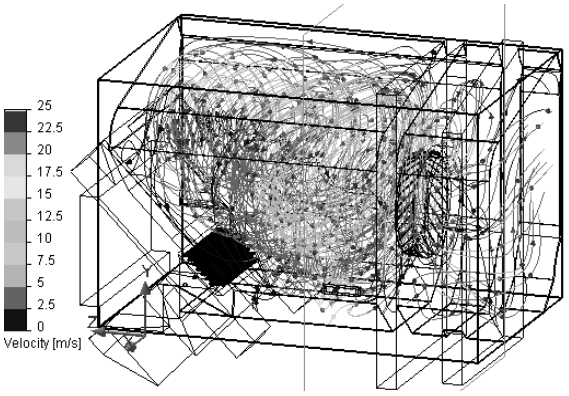

Рис.3 Линии тока в топке котла ДЕ-10-14

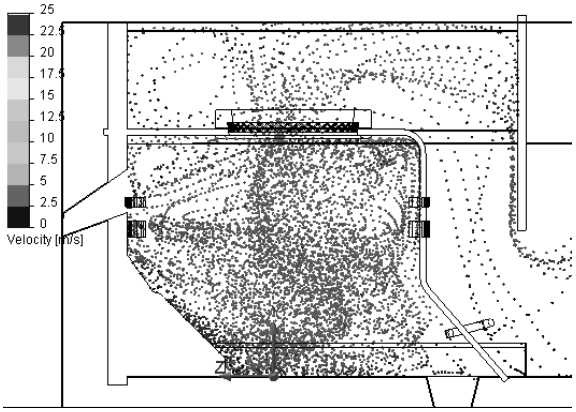

Рис.4 Оценка времени пребывания частиц топлива в топке котла КВ-ГМ 10-150

При пусконаладочных работах на котле КВ-ГМ 10-150 при работе на угле и смеси щепы и угля температура в топке достигла проектных значений, котел вышел на режим, удалось добиться устойчивого горения и работы котла в автоматическом режиме. Слой топлива на колосниках четко можно разделить на участки сушки топлива 1, выхода летучих 2 и горения коксового остатка 3 (рисунок 5).

Как показали испытания, котел на всех нагрузках работает достаточно эффективно. Коэффициент полезного действия составил 76% при расчетном значении 80%. Коэффициент избытка воздуха за котлом составляет 2,0...1,6, с ростом нагрузки уменьшается за счет улучшения смесеобразования и дожигания продуктов неполного сгорания с ростом теплонапряжения топки и камеры догорания.

Теплопроизводительность котла составила 8 Гкал/ч. Достигнутая максимальная теплопроизводительность котла определялась, в основном, влажностью топлива. Коэффициент полезного действия котла 76%, температура уходящих газов 166°С, выбросы оксидов азота 49...191 мг/м^3, что не превышает нормативные данные (230 мг/м^3). Удельный расход условного топлива 170 кг у.т./МВт.

На основе данных, полученных при пусконаладочных работах на котлах ДКВр 6,5-13ПМ, ДЕ 10-14ГМ и КВ-ГМ 10-150 рассчитаны коэффициент тепловой эффективности экранов ψ=0,833 и коэффициент, учитывающий положение максимума температуры пламени M_0=0,47. С использованием этих коэффициентов выполнен проект водогрейного котла КВм-3,0ДВО мощностью 3 МВт для сжигания кородревесных отходов.

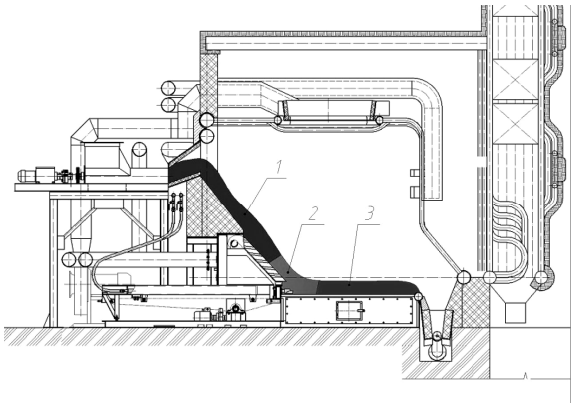

Рис.5 Участки горения в котле КВ-ГМ 10-150

При этом активно использовалось математическое моделирование для определения такого положения сопел и распределения дутья, чтобы над слоем топлива сформировался широкий горячий фронт для эффективной сушки и воспламенения топлива (рисунок 6).

Благодаря развитой внутритопочной аэродинамике и ступенчатой подаче необходимого для горения воздуха масса выбросов оксида азота значительно меньше, чем в типовых топках, что особенно важно при установке твердотопливных котлов в населенных пунктах.

Специально организованная гидравлическая схема котла существенно снижает опасность накипеобразования на внутренней поверхности труб, что делает котел менее требовательными к химическому составу воды. Этому способствуют оптимальные скорости движения воды, при сравнительно невысоком общем гидравлическом сопротивлении.

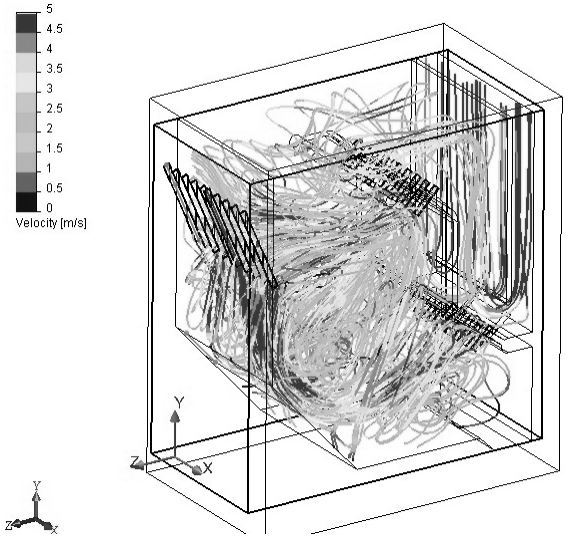

Рис.6 Линии тока в топке котла КВм-3,0ДВО

Предлагаемые формулы и коэффициенты возможно использовать при расчетах подобных схем сжигания низкосортного топлива. Это такие коэффициенты, как:

- коэффициент тепловой эффективности экранов $\psi = 0{,}833$ (топливо – бурый уголь Мунайского разреза);
- коэффициент, учитывающий положение максимума температуры пламени $M_0 = 0{,}47$.
- потери тепла от химической неполноты сгорания $q_3 = 0{,}5\%$;
- потери тепла от механической неполноты сгорания $q_4 = 3\%$.

ВЫВОДЫ

- Проведены эксперименты по сжиганию одиночных частиц разной массы бурого угля Мунайского разреза на установке для определения динамики термического разложения топлива.
- Предложена формула для вычисления времени стадий горения частиц топлива. Расчетные и экспериментальные данные использовались при численном моделировании аэродинамики топочных устройств при расчете необходимого времени нахождения горящей частицы в объеме топки до полного выгорания.
- Предлагаемую формулу можно использовать при расчетах подобных схем сжигания низкосортного топлива.
- Уточнены значения следующих коэффициентов при сжигании в вихревой топке бурого угля Мунайского разреза: коэффициент тепловой эффективности экранов, коэффициент, учитывающий положение максимума температуры пламени, потери тепла от химической и механической неполноты сгорания топлива.
- На основе анализа характеристик бурого угля Мунайского разреза приведены рекомендации по дальнейшему конструированию топочных устройств для его эффективного сжигания.
- Предложен профиль топочной камеры, который позволяет удерживать частицы топлива в топочной камере до их полного выгорания.
- Результаты работы использовались при разработке серии водогрейных котельных агрегатов тепловой мощностью 1…3,5 МВт. Котлы этой серии введены в эксплуатацию в России (Алтайский край, Кемеровская область, Новосибирская область, Омская область) и Белоруссии. Кроме того, полученные данные использовались при реконструкции паровых котлов производительностью до 10 т/ч и водогрейных котлов мощностью до 10 МВт.
- Соответствие результатов численного моделирования результатам натурных испытаний указывает на возможность использования математического моделирования на начальных стадиях разработки новых конструкций топочных устройств вместо натурных экспериментов, что удешевит и ускорит их ввод в эксплуатацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков Е.Б. Исследование свойств и процессов горения нетрадиционных топлив. Материалы III семинара вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике / Е.Б. Жуков, В.И. Симанов, И.Д. Фурсов, В.А. Голубев. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2003.

   Zhukov E.B. Research of properties and combustion processes of unconventional fuels. Materials of IIIrd Seminar of universities in Siberia and the Far East on thermal physics and thermal power / E.B. Zhukov, V.I. Simanov, I.D. Fursov, V.A.Golubev. – Barnaul: Publish. AltSTU, 2003.

2. ПЭМ 031.00.000 – Реконструкция котла ДКВр 6,5-13 ПМ. – Барнаул: СКБ Про-

© Якимова И.С., Фурсов И.Д., Жуков Е.Б.

ЭнергоМаш, 2010.

PEM 031.00.000 - Upgrade of boiler DKVR 6,5-13 PM. – Barnaul: SKB ProEnergoMash, 2010.

3. ПЭМ 032.00.000 – Реконструкция ДЕ 10-14 ГМ О с переводом на сжигание угля в вихревой топке "Торнадо" – Барнаул: СКБ ПроЭнергоМаш, 2010.

   PEM 032.00.000 - Upgrade of boiler DE 10-14 GM O for coil firing in vortex furnace «Tornado». – Barnaul: SKB ProEnergoMash, 2010.

4. ПЭМ 033.00.000 Реконструкция КВ-ГМ 10-150 с переводом на сжигание смеси угля и древесной щепы в вихревой топке "Торнадо" – Барнаул: СКБ ПроЭнергоМаш, 2010.

   PEM 033.00.000 - Upgrade of boiler KV-GM 10-150 for coil and wood chips co-firing in vortex furnace «Tornado». – Barnaul: SKB ProEnergoMash, 2010.