УДК 662.76

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ

Махаев А.Д., Рыжков А.Ф., Вальцев Н.В., Гордеев С.И., Ременюк А.В., Микула В.А., Абаимов Н.А.

Уральский федеральный университет имени Б.Н.Ельцина, Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Проведены расчетно-аналитические исследования некоторых аспектов использования твердого топлива в гибридной ПГУ с воздухонагревателем, включая термическую эффективность схемы, получение и сжигание топливного газа в газовой турбине.

Рассмотрена работа прямоточного и циклонного реакторов низкотемпературной термохимической конвекции. Описаны особенности работы и достоинства циклонного реактора.

Дана краткая аргументация выбора рекуперативного радиационно-конвективного металлического воздухоохладителя. Приведены результаты поискового моделирования элемента радиационной секции ВВЗН в ANSYS CFX. Дана аргументация выбранного подхода к математическому моделированию термохимической конверсии при газификации с использованием пакета прикладных инженерных программ ANSYS.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возрастает интерес к использованию твердых топлив в энергетике. Это связано, во-первых, со значительным сокращением запасов природного газа и нефти, во-вторых, с достаточно высокой ценой этих энергоресурсов. Перспективным направлением является ПГУ на твердом топливе.

Кроме того, проблемы «чистого» использования угля, необходимость модернизации национальной энергетики, расширения использования местной топливной базы и повышения энергоустойчивости территорий ставит сложные задачи по созданию парка новых технологий сжигания твёрдых топлив. В этом направлении заметные перспективы сулит технология производства теплоэлектроэнергии на основе гибридной угольной ПГУ.

На рис.1 приведена принципиальная структурная схема гибридной ПГУ разработки ИЦЭУ-УрФУ (маршрут 1), отличающаяся от известных аналогов (маршруты 2, 3) по технологии подготовки рабочего тела газовой турбины и схемам утилизации низкопотенциальной теплоты в комбинированном цикле [1-2]. Эта схема включает в себя: высокоскоростную термохимическую конверсию угля, газификацию в поточных аппаратах; подогрев циклового воздуха после компрессора в воздухонагревателе за счет сжигания полукокса до максимально возможной, поусловиям термостойкости конструкций, температуры; ввод полукокса при температуре процесса термохимической конверсии непосредственно в топочное устройство; догрев циклового воздуха до расчетной температуры цикла путем сжигания газа непосредственно в воздушном потоке перед вводом его в проточную часть газовой турбины.

Благодаря гибридному принципу сжигания – внешнему – в воздушном котле и внутреннему – в камере догрева перед газовой турбиной к узлу термохимической конверсии предъявляются существенно менее жесткие требования, чем в случае IGCC. Основанием служит отказ от необходимости непременной безостаточной газификации в пользу частичной (пиролиз, карбонизация). Это позволяет максимально разгрузить узел ТХК от наиболее затратной стадии – окисления нелетучего углерода. Последнее позволяет отказаться от высокотемпературного режима конверсии,

© Махаев А.Д., Рыжков А.Ф., Вальцев Н.В., Гордеев С.И., Ременюк А.В., Микула В.А., Абаимов Н.А.

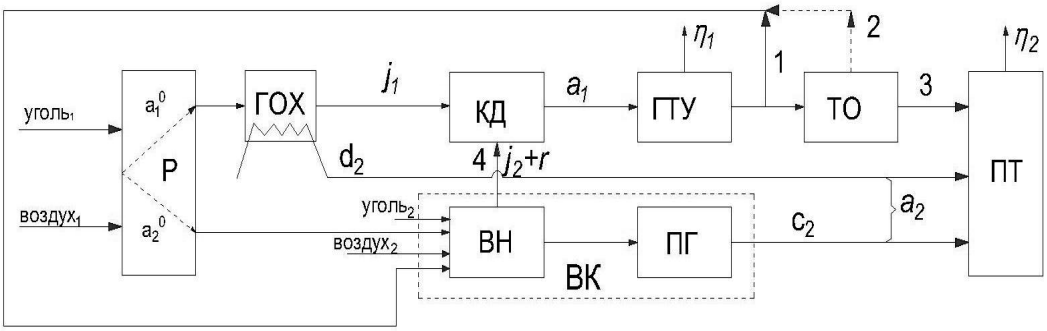


Рис.1 Структурная схема гибридных ПГУ с воздухонагревателем: ГОХ – газоохладитель; КД – камера догрева циклового воздуха; ГТУ – газотурбинная установка; ТО – газоводяной теплообменник; ПТ – паровая турбина; ВК – «воздушный» котел; ВН – воздухонагревательная часть «воздушного» котла; ПГ – парогенерирующая часть «воздушного» котла; Р – реактор термохимической подготовки топлива; j_1, j_2 - относительные потоки теплоты, вносимые в камеру сгорания соответственно с топливным газом и нагретым воздухом без учета теплоты регенерации; d_2 – относительный поток теплоты из газоохладителя в паровую турбину; c_2 – относительный поток теплоты из парогенерирующей части «воздушного» котла, r – доля теплоты выхлопа газовой турбины, регенерируемая в цикле; 1 – схема ИЦЭУ-УРФУ с воздухонагревателем (потоки 2 и 3 = 0); 2 – схема Foster Wheeler с ВПГ (потоки 1 и 3 = 0); 3 – схема ABGC с НПГ (потоки 1,2 и 4 = 0).

применяемого в ПГУ –IGCC в пользу низкотемпературного.

Потребность в топливном газе при гибридной схеме питания по теплу меньше в сравнении с IGCC в 2-3 раза, а применение низкотемпературной конверсии снижает в ~2 раза потери с физическим теплом из газоохладителя.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ

Изучение прогрева пылевоздушного потока и газификации угольной пыли проводилось на прямоточном реакторе термохомической конверсии с внутренним диаметром 50 мм и высотой обогреваемой части 1200 мм, схема которого приведена на рис.2.

Топливно-угольная пыль размером частиц 0-500 мкм, подается из бункера 15 через дозирующую шайбу в инжектор-смеситель 14. Расход топлива после тарировки составил 7,14 кг/ч. К инжектору-смесителю воздух подается после воздухоподогревателя 11, погруженного в слой инертного материала. Температура воздуха (200-400°С) регулировалась после воздухоподогревателя подмешиванием холодного воздуха в поток горячего.

Реактор предварительно разогревался электрическими нагревателями 3 до температуры от 700 до 900°С, в нём происходил процесс горения и газификации угольной пыли, время пребывания частиц в реакторе составляло 0,8-1,2 секунды. Поле температур по высоте реактора и состав газов измерялись во время опытов с помощью термопары и хроматографа.

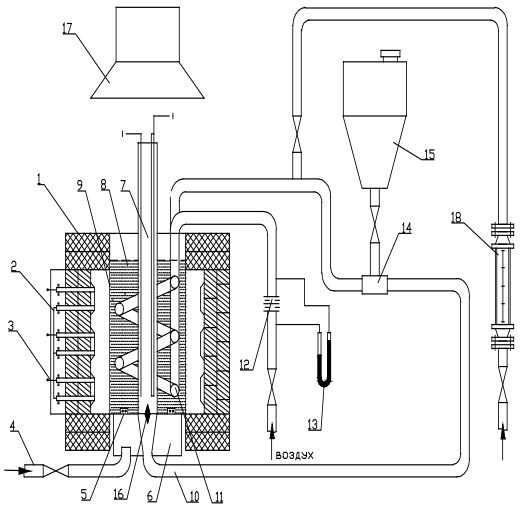


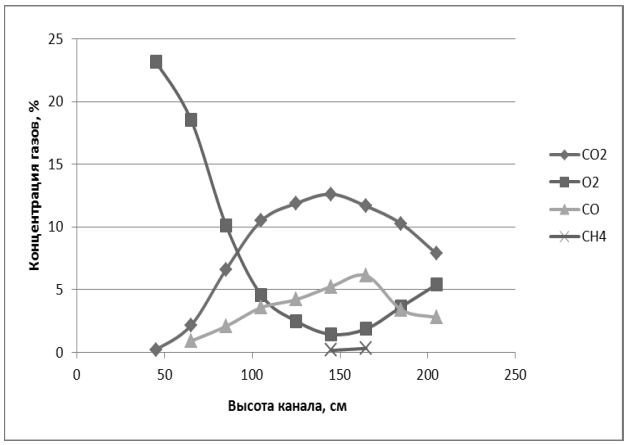
Рис.2 Прямоточный реактор термохомической конверсии.

1-кожух установки; 2,3-электрические нагреватели; 4- подача воздуха на псевдоожижение; 5-воздухораспределительные колпачки; 6- газораспределительная решетка; 7-центральная труба; 8-слой псевдоожиженных частиц; 9-реторта; 10-пылепровод; 11 воздухонагреватель; 12-диафрагма; 13-дифманометр; 14-инжектор-смеситель; 15-бункер топлива; 16-сопло; 17-зонт вытяжной вентиляции; 18-ротаметр воздуха для подмешивания.

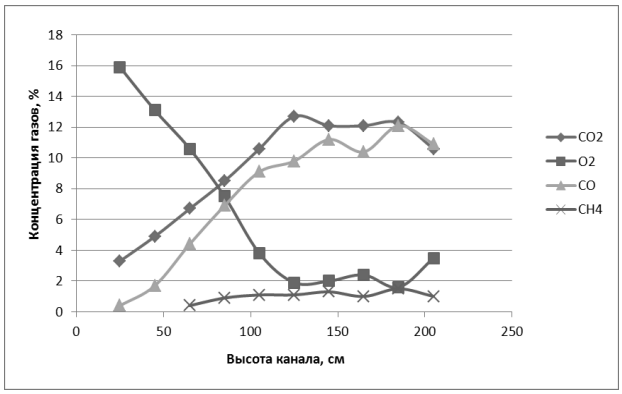
Для опытов использовался уголь Баганурского месторождения (Монголия). Это бурый уголь марки Б2 3-ей группы взрывоопасности, зола легкоплавкая ($t_в$=1144°С).

Установка работала в двух режимах:

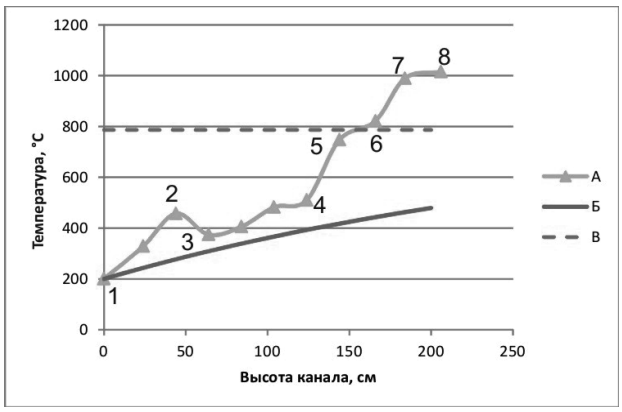
1. неполного горения α=0,9 (рис.3а, в);
2. частичной газификации α=0,6. (рис.3б, г).



а) Концентрация газов по высоте реактора, tст=777-795°С, α=0,9.

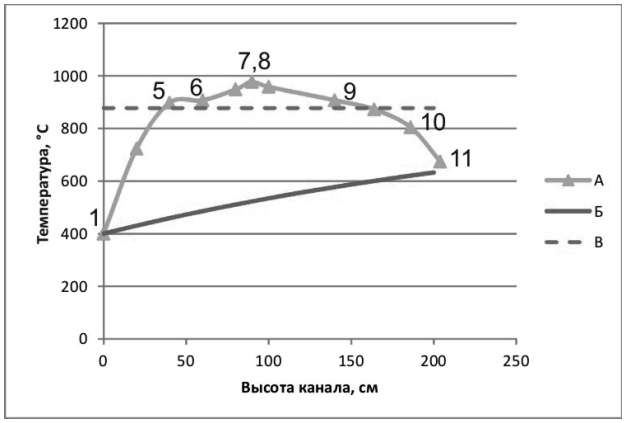


б) Концентрация газов по высоте реактора, tст=870-885°С, α=0,6.



в) Динамика изменения температуры по высоте реактора, tст=777-795°С, tгор. в-ха=200°С, α=0,9;

А – по данным эксперимента; Б – расчетная температура прогрева запыленного потока от стенок; В – температура стенки.



г) Динамика изменения температуры по высоте реактора, tст=870-885°С, tгор. в-ха=400°С, α=0,6;

А – по данным эксперимента; Б – расчетная температура прогрева запыленного потока от стенок; В – температура стенки.

Рис.3 Экспериментальные данные по конверсии угольной пыли в прямоточном реакторе термохомической конверсии.

Анализ экспериментальных данных по конверсии угольной пыли в прямоточном реакторе термохомической конверсии (рис.3) позволяет сделать следующие выводы:

1. Как и следовало ожидать, увеличение температуры стенки реактора и снижение коэффициента избытка воздуха способствуют увеличению выхода горючих газов CO и CH4, следовательно, - увеличению теплоты сгорания горючей смеси

на выходе из установки. Так, при tст около 800°С и α ≈ 0,9 максимальный выход оксида углерода (СО) составил 6,1%, метана – 0,3%. При tст около 900°С и α ≈ 0,6 максимальный выход оксида углерода составил 12,1%, а метана – 1,5%. Теплота сгорания газов составила 2073 кДж/нм^3, а теоретическая температура горения ~ 1050°С. С увеличением температуры топливной смеси температура горения будет возрастать и при температуре 900°С составит ~ 1650°С.

2. В режиме частичной газификации на высоте 1250 мм от нижнего среза экспериментального канала наблюдается максимальное значение концентрации CO_2 и минимальное – O_2. На этой высоте при имевшей место скорости потока заканчивается кислородная зона и завершается процесс горения. Далее начинается зона восстановления CO_2 (зона газификации).

В динамике изменения температуры потока в первом случае (рис.3в) можно выделить стадии: 1-2 – начальное повышение температуры за счет сгорания продуктов низкотемпературного пиролиза; 3-4 – разогрев аэросмеси как инертной среды, выделение основной массы летучих; 4-5 – предвоспламенной саморазогрев аэросмеси за счет окисления летучих; 5-6 – изотермическая «выдержка» на уровне температуры муфеля в зоне, где заканчивается обогреваемая часть 1200 мм; 6-7-8 – горение коксовых частиц с заметным перегревом относительно муфеля в выходном участке реактора.

В другом случае (рис.3г): 1-5 – здесь описанные выше стадии «сложились»; 6-9 – слабоэкзотермический процесс выгорания остатков кислорода; 9 – конец кислородной зоны; 9-10 – низкоинтенсивная газификация; 10-11 – концевой эффект; на выходе правее точки 11 – факел, более мощный, чем в первом эксперименте.

3. Во всех опытах максимальная температура горения пылевоздушной смеси в канале не превышала 1000°С, что ниже температуры плавления золы, составляющей 1100-1200°С.

4. Из графиков (рис.3) следует, что для получения горячей смеси топливных частиц и горючего газа, достаточно времени пребывания частиц пыли в муфеле 0,6 с, что при скорости потока 3 м/с соответствует длине муфеля 1800 мм.

В основу работы циклонного реактора термохимической конверсии (рис.4) был положен вихревой принцип, относительно широко использовавшийся в свое время для сжигания дробленого и пылевидного топлива в полувосстановительной среде в высокотемпературном режиме с жидким шлакоудалением [3] и реже – в низкотемпературном режиме с твердым шлакоудалением [4].

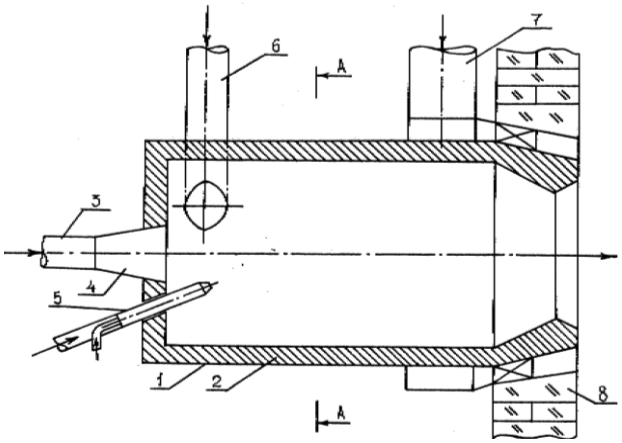


Рис.4 Циклонный реактор термохимической конверсии. 1 – корпус с огнеупорной излучающей обмуровкой – 2 (туннель, муфель, предтопок); 3 – соосный обмуровке патрубок подачи пылевоздушной смеси со щелевым устьем – 4; 5 – две одинаковых вспомогательных жидкотопливных или газовых горелки, размещенных симметрично относительно продольной оси щелевого устья патрубка (выходной части пылевой трубы); 6 – подвод вторичного воздуха; 7 – подвод третичного воздуха; 8 – обмуровка топки.

Растопка реактора осуществляется следующим образом. Зажигаются две вспомогательные жидкотопливные или газовые горелки 5. Затем через патрубок 3 подается пылевоздушная смесь (угольная пыль с первичным воздухом), которая выходя через щелевое устье 4 приобретает форму плоской струи вытянутой по вертикали. Струя имеет развитую боковую поверхность и в начальный момент (до прогрева обмуровки) воспринимает излучением теплоту вспомогательных жидкотопливных или газовых горелок одновременно с обеих сторон, что позволяет достаточно быстро осуществить предварительный нагрев пылевидного топлива.

В реакторе идет процесс окислительного пиролиза и частичной газификации, образующиеся газообразные продукты горят, дополнительно нагревая угольную пыль, что способствует интенсификации прогрева пылевоздушного потока. После прогрева обмуровки до температуры, обеспечивающей устойчивую работу (~700°С), вспомогательные горелки от-

ключаются, а дальнейший нагрев и воспламенение пылевидного топлива будет происходить за счет излучения стенок обмуровки, температура которых, в свою очередь, поддерживается частичным сжиганием продуктов пиролиза угольной пыли внутри туннеля.

При разработке конструкции циклонного реактора термохимической конверсии выдержаны основные рекомендации для горизонтальных циклонов: это малая длина L = 1,2 м и диаметр D = 0,8 м близок к $D_{мин}$ = 1,1 м. Подача тонкой угольной пыли – аксиальная с первичным воздухом, закрученный поток вторичного воздуха через сопло установленное вблизи верхней образующей.

Но имеются и отличия:

применение щелевой прямоточной угольной горелки;

низкотемпературный режим (700-900°С);

низкий коэффициент избытка воздуха (~0,5);

значительный выход нелетучего углерода (коксового остатка).

В отличие от классических циклонных предтопков, предназначенных для сжигания дробленого топлива до тонины 10 мкм, циклонный реактор термохимической конверсии работает практически без вентильного эффекта, транспортируя по закрученной траектории частицы угольной пыли практически без изменения их размеров. Для этого применяются умеренные входные скорости вторичного воздуха (20-25 м/с) и слабоконическую развернутую вовне сопловидную выходную горловину.

Вследствие центробежного эффекта, наиболее сильного в головной части циклонного реактора, плоско-коническая пылеугольная струя разрывается и втягивается во вращательное движение, создавая, по терминологии одного из родоначальников вихревой технологии Г.Ф. Кнорре «циркулирующий слой». Освобожденная таким образом приосевая зона заполняется обратными токами регенерации продуктов окислительного пиролиза и неполного горения.

Образование газовой горячей смеси, и ее воспламенение осуществляется в головной части благодаря рециркуляции тепла и химически активных элементов («радикалов») из хвостовой части реактора. Устойчивость процесса обеспечивается циркуляционным движением пылевого потока при сравнительно медленном его дрейфе к выходной горловине. Дополнительный стабилизирующий эффект обеспечивает обмуровка муфеля за счет переизлучения тепла на частицы и конвективного теплообмена с потоком газовзвеси.

Использование реактора в качестве растопочной горелки хорошо зарекомендовало себя в процессе испытаний и может рекомендоваться для растопки пылеугольных котлов, работающих как на бурых, так и каменных углях. Для поддержания рабочего режима горелки требуется ~ 400-600 ккал/кг угля в зависимости от вида топлива. Основная доля этого тепла выделяется за счет частичного сжигания летучих, поэтому главное требование к углю – достаточная теплота сгорания летучих.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ

Для создания установки большей мощности и исследования влияния управляющих воздействий на состав получаемого газа необходимо численное моделирование процесса ТХК, обеспечивающее приемлемый результат. При использовании воздуха в качестве окислителя картина происходящих явлений будет смазанной, из-за разбавления балластом (азотом), поэтому на стадии создания адекватной модели реактора для получения наглядных результатов выполнено моделирование процесса парокислородной газификации углерода.

Моделирование проводилось в несколько этапов:

1. С использованием уравнений основных гетерогенных химических реакций:

$C + O_2 = CO_2$, ΔH = -404.7 кДж/моль, (1)

$C + H_2O = CO + H_2$, ΔH = 118.5 кДж/моль, (2)

$C + CO_2 = 2\ CO$, ΔH = 159.9 кДж/моль. (3)

2. С добавлением вторичных взаимодействий в газах

$CO+H_2O = CO_2+H_2$, ΔH = -42,4 кДж/моль. (4)

3. С двухстадийным вводом окислителя (кислорода).

4. С заменой кислорода на воздух.

Скорость гетерогенных реакций (V) может быть описана [13] выражением:

V = K * exp (-Ta/T) * Cg * A. (5)

Диапазон и рекомендованная величина значений K и Ta для реакций (1-3) приводятся в таблице 1, коэффициент A изменяется в пределах 1000-10000 $м^2$/кг и до 100000 $м^2$/кг. Следуя Гамбургу расчет можно проводить, используя приведенные закономерности, при

условии, что процесс протекает в кинетической области.

Таблица 1. Величины значений K и Ta.

	$C + O_2 = CO_2$	$C + H_2O = CO + H_2$	$C + CO_2 = 2\ CO$
K	1.3-15 * 10^8, м/с	5.0-20 * 10^4, м/с	1.17-59 * 10^5, м/с
	1.3 * 10^8, м/с	5.0 * 10^4, м/с	1.17 * 10^5, м/с
Ta	19231-38462, K	14423-24039, K	25601-34135, K
	25000, K	16827, K	29808, K

Область применимости, указанных констант, определена Гамбургом как, температура газификации выше 1400 K, а диаметр частиц 0.005-0.5 мм. В работе Головиной [5] для частиц диаметром 0.5-0.8 мм и температуры газификации 950-1350 K скорость реакции (2) в десятки раз больше скорости реакции (3). Монастырева указывает [6] для частиц диаметром 0.1-3 мм и температуры газификации 900-1350 K, что скорость реакции (2) в 3-5 раз больше скорости реакции (3).

Процесс термохимической конверсии частиц углерода происходит во взвешенном пылевом облаке. Режим газификации выбран таким образом, чтобы при 100% -ой степени конверсии кокса и полном расходовании газифицирующих агентов равновесная температура продуктов была приблизительно равна 1400 K.

В реактор цилиндрической формы подается парокислородная смесь и частицы, состоящие из углерода. Дисперсная фаза, как принято, состоит из одной фракции диаметром 50 микрон. Давление газификации атмосферное. Окружающие реактор стенки являются адиабатическими.

Численное моделирование процесса термохимической конверсии кокса проводится в пакете программ ANSYS 12.1 CFX. Скорость гетерогенных реакций (1-3) задана при помощи опции «Particle User Routine». Другие возможные способы задания скорости гетерогенной реакции: «Mass Arrhenius», «Field Char Oxidation Model», «Gibb Char Oxidation Model» не подходят. Опция «Mass Arrhenius» требует, чтобы все исходные реагенты принадлежали к одной и той же фазе. Два другие способа – поскольку требуют, чтобы для газовой фазы реагентом был кислород.

Для уменьшения размерности исходной осесимметричной задачи от полной геометрии принимается во внимание только сектор с центральным углом 5 градусов. Расчетная сетка состоит из 127532 элементов.

На рисунке 5 приведена диаграмма мольных скоростей расходования или выделения компонентов газовой смеси (O_2, H_2O, CO_2) приведенных к мольной скорости расходования кислорода.

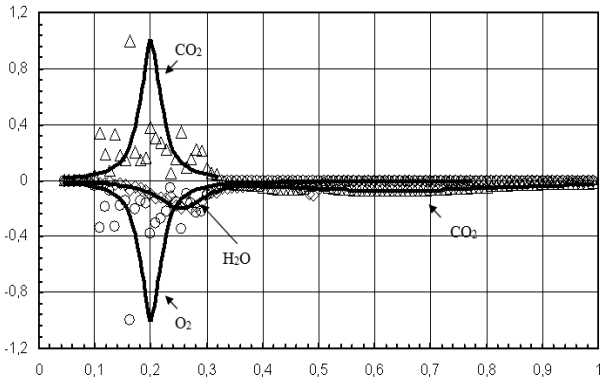


Рис.5 Диаграмма приведенных мольных скоростей расходования или выделения компонентов O_2, H_2O и CO_2 по длине реактора.

Наиболее медленной стадией газификации является взаимодействие коксовой частицы с углекислым газом, что определяет требуемое время нахождения частицы в реакторе.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ

Одним из ключевых элементов гибридной схемы является высокотемпературный воздухонагреватель (ВВЗН). Он позволяет эффективно передавать тепло, выделяющееся при сжигании, «чистым» рабочим средам для перспективных турбин, работающих при температуре 1480°C, а также воздуху и другим газам, используемым в перспективных процессах.

Ставится задача нагреть воздух перед ГТУ до 700-1000°C за счет теплоты, выделяющейся при

сжигании твердого топлива (полукокс или уголь); выбор оптимальной конструкции ВВЗН под эту задачу был сделан на основе литературного обзора. При выборе конструкционного материала учитывалось, что керамические материалы (имеющие самый высокий уровень максимальной температуры) не обеспечивают газоплотности конструкции даже при небольших избыточных давлениях, поэтому остановились на сталях.

Наибольшей жаростойкостью обладают стали, легированные хромом, при содержании его 25—30% максимальная температура для жаропрочных сталей достигает 1000—1100°С. Для защиты оборудования из углеродистых и легированных сталей от окисления и коррозии при высоких температурах, а также от действия горячих агрессивных сред успешно применяют силикатные эмалевые покрытия. Применение эмалей, разработанных ГНЦ РФ ОАО «Уральский институт металлов», позволят работать трубам при температуре до 1200°С. В результате, для дальнейших расчетов ВВЗН было принято ограничение по максимальной температуре материала – не более 1000°С.

Для достижения требуемой температуры подогрева воздуха (700-1000°С) в воздухонагреватель должен иметь 2 секции: конвективную и радиационную. Использование более компактных регенеративных или пластинчатых конструкций для конвективной секции неприемлемо, прежде всего, потому, что в продуктах сгорания присутствуют частицы золы, а указанные конструкции плохо приспособлены для очистки. В результате, для конвективной секции выбрана рекуперативная конструкция из стальных труб.

В радиационной части принята классическая конструкция с экранными трубами. Совершенствование радиационной части ВВЗН может осуществляться благодаря использованию эффективных способов интенсификации теплообмена. Одним из способов является использование вставок внутри труб для увеличения внутренней поверхности теплообмена, что позволяет повысить температуру подогреваемого воздуха и удельное тепловосприятие ВВЗН, а также уменьшить температуру стенок и термические напряжения [7]. Использование вставок в радиационной части ВВЗН, используемого в схеме ПГУ, должно сделать его более компактным. Кроме того, можно ожидать уменьшения металлоемкости. Толщина стенки наружной трубы рассчитывается на разницу давлений воздуха и продуктов сгорания в десятки бар, а внутренняя вставка окружена с обеих сторон воздухом с одним давлением, и создавая дополнительную внутреннюю поверхность теплообмена, она может иметь минимальную толщину.

Для оптимизации конструкции радиационной части ВВЗН было проведено поисковое исследование (в пакете ANSYS) в области теплообмена в трубах со вставками. Для моделирования среди множества возможностей программы было выбрано приложение ANSYS CFX, так как оно позволяет произвести расчеты и анализ гидрогазодинамических процессов, многофазных потоков, химической кинетики, горения и радиационного теплообмена.

В исследовании проведено моделирование теплообмена в коаксиальных трубах (рис.6). Рабочей средой в обеих трубах является воздух. Газы отдают теплоту стенкам излучением и конвекцией, внешняя труба переизлучает теплоту на внутреннюю трубу, а воздух, омывая внешнюю трубу с внутренней стороны и внутреннюю трубу с обеих сторон, получает теплоту конвекцией.

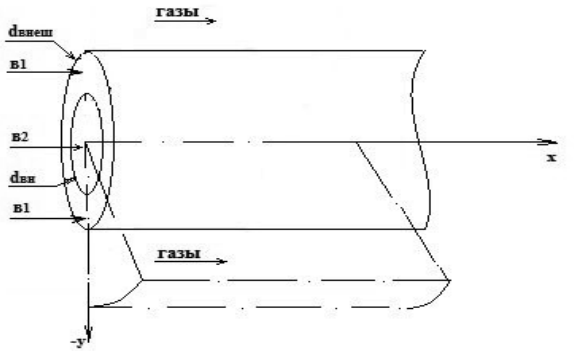


Рис.6 Геометрическая модель: в1, в2 – воздух в наружной трубке, воздух во внутренней трубке; dвн, dвнеш – диаметр внутренней трубки, диаметр наружной трубки.

Конструктивными характеристиками геометрической модели являются:

диаметр внешней трубы - 83 мм;
диаметр вставки (внутренняя труба) - 51 мм;
материал стенки обеих трубок – сталь;
толщина стенки обеих трубок – 3.5 мм;
ширина потока продуктов сгорания - 120 мм;
длина излучающего слоя - 2000 мм

Важной процедурой первого этапа является построение сетки. Для уменьшения размерности задачи рассматривается процесс теплообмена в сегменте в 5° для одной трубки. В связи с этим был выбран метод контрольного объема для построения сетки. Сетка ортогональная, блочная. В

процессе исследования сравнивались три сетки с разным количеством элементов. Количество элементов первой сетки составляет 5400, второй сетки – 21600. Третья сетка имеет такое же количество элементов, как и вторая (21600), но на пограничном слое сделана более частой (в 1,5 раза).

Второй этап моделирования заключается в задании граничных условий. Для расчета излучения использовались модель P1 [8] и модель серого газа. Для моделирования конвективного теплообмена использовалась k-ε модель турбулентности. Был задан следующий массовый состав газов: CO_2=0.12, H_2O=0.112 , N_2=0.768. На входе задавался установившийся профиль скоростей, а на выходе - нулевое избыточное давление. Схема движения сред в воздухонагревателе прямоточная, газы на входе имеют температуру T=1400°C и скорость 1 м/с , а воздух - 450°C и 18 м/с ($Re_в$=17623, режим течения - турбулентный).

Моделирование выполнено для двух вариантов: труба со вставкой и без нее. Полученные результаты на второй и третьей сетках отличаются в пределах заданной погрешности (±30К), следовательно, дальнейшее увеличение плотности сетки, не влияет на решение задачи.

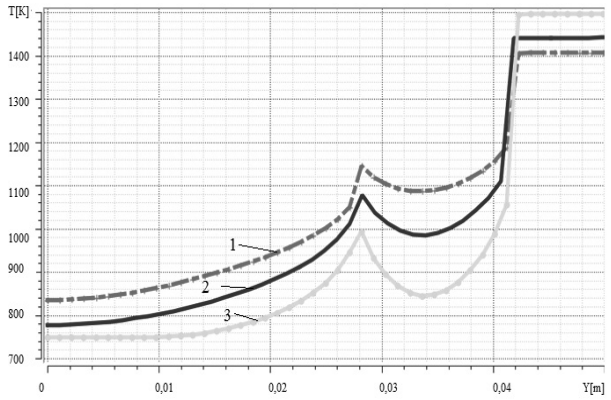


Рис.7 Распределение температур сред в модели трубы со вставкой в радиальном направлении: 1 – X=0.5м, 2 - X=1м, 3 - X=1.5 м.

При использовании одной вставки температура стенок внутренней и внешней труб на входе и выходе сред отличается на 40-50°C (рис.7). Это может означать, что можно развивать систему вставок, т.е. внутри имеющейся вставки можно размещать еще вставки. Увеличение количества вставок может позволить увеличить внутреннюю поверхность теплообмена, температуру подогреваемого воздуха и уменьшить температуру стенки внешней трубы, что возможно позволит повысить температуру продуктов сгорания на входе ВВЗН и приблизить коэффициент избытка воздуха (в факеле, при сжигании твердого топлива) к оптимальному уровню, определяемому только полным выгоранием топлива. Следствием будет снижение объема продуктов сгорания и затрат электроэнергии на тягодутьевом оборудовании воздухонагревателя.

Инженерные расчеты ВВЗН производились для гибридной схемы ПГУ на твердом топливе мощностью 32 МВт. В качестве прототипа для ВВЗН принята схема [9] воздушного котла для газотурбинной установки, работающего на угольной пыли. Цикловой воздух последовательно проходит через радиационную и конвективную секции рис.8.

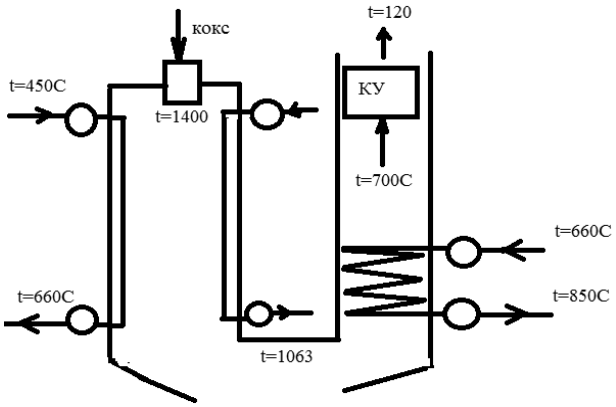


Рис.8 Расчетная схема высокотемпературного воздухонагревателя.

Исходными параметрами для расчета служили величины представленные в табл.2.

Таблица 2. Исходные параметры.

Наименование параметра	Единицы измерения	Численное значение
Температура воздуха на входе /выходе ВВЗН	°C	450/850
Массовый расход воздуха	кг/с	39
Скорость воздуха на входе в радиационную и конвективную секции	м/с	18
Давление воздуха в радиационной/конвективной секциях	атм	20/18
Температура газа на выходе конвективной секции	°C	700

Расчет проводился в несколько стадий по следующему алгоритму:

1. Проводился конструктивный тепловой расчет ВВЗН (без использования вставок), который состоял в совместном решении уравнений теплового баланса и теплопередачи и производился методом последовательных приближений. Задаваясь температурой продуктов сгорания на входе ВВЗН, определяли: температуры стенок труб на входе и выходе каждой секции ВВЗН; геометрические характеристики и площади поверхностей нагрева.

2. Проводился расчет радиационной секции ВВЗН со вставками по [10], используя геометрические характеристики, полученные на 1 стадии расчета. Одним из результатов этого расчета была средняя температура стенки наружной трубы, если использование вставок не позволяло снизить температуру стенки ниже 10000С, то задавались более низкой температурой продуктов сгорания на входе ВВЗН и корректировалась 1-ая стадия расчета.

Полученные результаты инженерных расчетов по температурам воздуха и продуктов сгорания представлены на рис.7, остальные в табл.3.

Таким образом, использование вставок в трубах радиационной секции позволило достигнуть следующих эффектов:

снижение температуры стенки внешней трубы на 150°С, при этом максимальная температура стенки (на входе радиационной секции) составляет 946°С, что ниже допустимого уровня;

теплоотдача с воздушной стороны увеличивается в 1,28 раз, и эффективный коэффициент теплоотдачи с воздушной стороны достиг 50 Вт/(м^2*°С);

при передачи одинакового количества теплоты от продуктов сгорания к воздуху, поверхность теплообмена снижается с 534м^2 до 464м^2.

Таблица 3. Результаты инженерных расчётов.

Параметры		Обозначения	без вставки	со вставкой
Ширина и глубина радиационной секции		м	3,5	3,5
Диаметр внешней трубы		мм	83/76	83/76
Диаметр внутренней трубы (вставки)		мм	-	56/51
Длина трубок		м	14	12
Количество трубок		шт	156	156
Необходимая поверхность нагрева		м^2	534	464
Число Рейнольдса для воздуха		Re	17623	17623
Температура стенки трубок	на входе	°С	1096	946
	на выходе	°С	858	708
	средняя	°С	977	828

ВЫВОДЫ

Конструирование реактора термохимической конверсии по типу низкотемпературного циклонного предтопка позволяет увеличить время пребывания частиц угольной пыли при сохранении малой длины и стабилизировать горение факела за счет организации обратных токов к его корню.

Испытания циклонного реактора термохимической конвекции, в качестве растопочной горелки, показали возможность растопки котлов из холодного состояния на бедном газе, малая теплота сгорания которого компенсируется тем, что топливовоздушная смесь выходит в топку при высокой температуре, за счет чего теоретическая температура горения повышается до значений (~1700°С), позволяющих получить устойчиво горящий факел и проводить растопку котла.

Наиболее медленной стадией газификации является взаимодействие коксовой частицы с углекислым газом, определяющей требуемое время нахождения частицы в реакторе. Поэтому переход на режим частичной газификации или окислительного пиролиза, позволяет значительно (на порядок) сократить время пребывания в нём топлива.

Поисковое моделирование элемента радиационной секции ВВЗН в ANSYS CFX показало, что при использовании внутренней вставки в трубе температура воздуха на выходе увеличивается на 105°С, а температура продуктов сгорания на выходе уменьшается на 90°С.

Рассчитан ВВЗН для гибридной схемы ПГУ на твердом топливе мощностью 32 МВт, позволяющий нагреть воздух до 850°С, не пре-

высив температуру металла в 946°С, при этом использование вставок позволило снизить температуру метала наружной трубы на 150°С и уменьшить поверхность воспринимающую тепловое излучение от продуктов сгорания с 534 до 464 м^2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Топал А.И. Экологически чистые угольные энерготехнологии. – К.: Наукова думка, 2004. – 187 с
2. Шульман В.Л., Зайцев А.В., Богатова Т.Ф. Развитие угольных парогазовых технологий. // Технологии эффективного и экологически чистого использования угля: Сборник докладов международной научно-технической конференции. – М.: «ОАО ВТИ», 2009. С. 246-251.
3. Стырикович М.А., Катковская К.Я., Серов Е.П. Котельные агрегаты. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959.
4. Кнорре Г.Ф. Топочные процессы. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1951
5. Головина Е.С. Газификация водяным паром кокса ирша-бородинского угля. // Новые способы использования низкосортных топлив в энергетике: Сб. науч. тр. / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского. – М., 1989. – С. 53-61.
6. Монастырева Т. Н. Исследование кинетики углекислотной газификации коксов углей разной степени метаморфизма // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. - № 4. – С. 15-20.
7. Сорока Б.С., Згурский В. А., Воробьев Н.В. Численный анализ характеристик высокотемпературного трубчатого рекуператора с внутренними вторичными излучателями как теплообменного аппарата. /Сборник научных статей «Современная наука». 2011.№2(7).
8. Modest. M. Radiative heat transfer. Second edition. San Diego, ed Academic Press. 2003.
9. Щварц В.А. Конструкции газотурбинных установок. М. «Машиностроение», 1970.
10. Щукин А. А. Экономия топлива в черной металлургии. Металлургия, 1973.