УДК 621.165:621.438: 662.9

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТА ГИБРИДНОЙ ПГУ

Гордеев С.И., Вальцев Н.В., Богатова Т.Ф., Рыжков А.Ф., Осипов П.В., Микула В.А.

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

АННОТАЦИЯ

Проведены в том числе и с использованием программного пакета Thermoflow расчетно-аналитические и экспериментальные исследования некоторых аспектов использования твердого топлива в гибридной ПГУ с воздухонагревателем включая энергетическую эффективность схемы, получение и сжигание топливного газа в газовой турбине. Сформулированы рекомендации по использованию известной топливной базы для получения горючего газа и сжигания его в высоконагретом воздухе.

Произведено моделирование радиационной части высокотемпературного воздухонагревателя в пакете Ansys CFX.

ВВЕДЕНИЕ

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. Одним из решений поставленных задач является постройка высокоэффективных парогазовых установок (ПГУ), в том числе и на твердом топливе. Разработка ПГУ на твердом топливе ведется по трем направлениям:

ПГУ с «внутренним» сжиганием (газификацией) (ПГУ – IGCC);

ПГУ с «внешним» сжиганием (с топкой КСД (ПГУ-КСД));

гибридные ПГУ (с пиролизером-карбонизатором кипящего слоя (ПГУ-КСД-К) и с высокотемпературным воздухонагревателем).

Из них первые два направления вышли на промышленный уровень, гибридные находятся на стадии разработки.

ПГУ с внутрицикловой газификацией (ПГУ-IGCC) развивались наиболее успешно и перешли к началу XXI века от демонстрационной стадии освоения к коммерческой. Основной недостаток ПГУ-IGCC - неоправданно большие затраты (~20%) на подготовку рабочего тела ГТУ, которые главным образом связаны с:

кислородной станцией

узлом газоподготовки.

В последнем все топливо переводится в горючий газ с завышенной против природного газа жаропроизводительностью (теоретической температурой горения), что требует его разбавления инертом при сжигании в камере сгорания газовой турбины (обычно применяют азот, полученный в установке разделения воздуха). Газогенерирующая часть таких ПГУ находится под давлением, превосходящим давление перед ГТУ.

Входящая в узел газоподготовки система газоочистки полученного газа представляет наименее надежное в схеме ПГУ сложное химическое предприятие с получением побочной товарной продукции (элементарная сера и др.).

ПГУ с топкой КСД были разработаны в 80 годах XX века. Отработанность технологии позволяет органично вписать такую установку в структуру ТЭС. Применение такой технологии позволяет повысить энергетический КПД на 6-8 % по сравнению с паросиловым циклом на такие параметры. Но невысокие начальные параметры газотурбинной части, определяемые

технологией кипящего слоя, не оставляют перспектив развития технологии без глубокой модернизации процесса.

Дальнейшей ступенью развития ПГУ на твердом топливе является реализация гибридного принципа. При использовании карбонизатора КСД продуктами термохимической подготовки топлива являются горючие компримированные газы, которые, после очистки, направляются в газовую турбину. В этом случае температура на входе в газовую турбину повышается, следовательно, повышается тепловая экономичность цикла. Фирма Foster Wheeler разработала схему ПГУ с карбонизатором и топпинг-процессом, что позволило бы достичь КПД на уровне 48-50%, но ввиду значительных технических сложностей схема в первозданном виде осуществлена не была. Другой технологией, исключающей недостатки схемы Foster Wheeler, хоть и в ущерб эффективности является технология ABGC фирмы MBEL и Ольстерского университета. Значения КПД нетто пилотной установки, работающей по такому циклу, достигают значения 44-45 %.

Реализованный в нашей гибридной схеме ПГУ принцип ступенчатого нагрева позволяет уйти от проблемы с материалами для рекуперативного воздухонагревателя, составляющей основное направление поисков при разработке схемы ПГУ с «внешним» сжиганием.

Основная проблема с конструкционными материалами для теплообменника – их термостойкость – решается путем нанесения защитных керамических покрытий на жаропрочные сплавы, что временно снимает остроту проблемы. В России имеется реальный опыт создания на энергетическом оборудовании жаро-износокоррозионностойких покрытий, обладающих антиадгезионными свойствами и пониженными коэффициентами трения при температуре стенки 1000-1200 ºС [1], позволяющим уже сегодня приступить к разработке высокотемпературного рекуперативного нагревателя циклового воздуха в виде воздушного котла с пылеугольной топкой.

Получение компримированного циклового воздуха в рекуператоре с указанными температурами уже является достаточным для работы поставляемых и применяемых ныне в России ГТУ. Впрыскивание в этот поток соответствующей присадки топливного газа позволяет в режиме беспламенного горения окислить его и нагреть цикловый воздух до требуемой температуры. Таким образом, реализуется «гибридная» схема ПГУ с двухступенчатым подогревом воздуха, разработанная и запатентованная специалистами предприятия УралОРГРЭС (в составе Инженерного центра энергетики Урала), УралЭНИН (в составе УрФУ) и ООО «Универсальная энергия»[2].

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИБРИДНОЙ 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 [2].

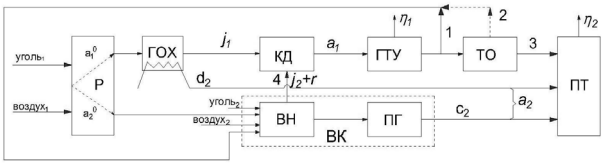

Рис.1 Структурная схема гибридной ПГУ.

Теплота, вносимая с топливом в реактор (уголь 1), распределяется в узле подготовки рабочего тела на три ветви: с топливным газом j1, с коксозольным остатком j2 и с потоком теплоты из газоохладителя d2. В зависимости от глубины переработки исходного угля и способа подготовки горючего газа к сжиганию мощность потоков будет меняться.

Рассмотрим в качестве предельных варианты d2=0 и d2=max. В первом случае для охлаждения газа используют водяной квенчинг с практически полной потерей физической теплоты газа. Во втором случае газоохладитель работает в режиме котла-утилизатора с генерацией водяного пара среднего давления.

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 наибо-

лее затратной стадии – окисления нелетучего углерода. Последнее позволяет отказаться от высокотемпературного режима конверсии, применяемого в ПГУ –IGCC в пользу низкотемпературного.

Поскольку применяемый в схеме реактор работает при давлении близком к атмосферному, для эффективной работы дожимного компрессора (условно не показан) охлаждение газа в газоохладителе предполагается глубокое. Охлажденный и очищенный газ подается дожимным компрессором в узел (камеру) догрева циклового воздуха перед газовой турбиной.

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. Таким образом, суммарный объем физического тепла, отводимого из узла газоочистки, окажется в 4-6 раз меньше по сравнению с IGCC. Поэтому для некоторых вариантов гибридной схемы экономически оправданным может стать применение мокрой системы газоочистки. А поскольку в схеме, приведённой на рис.1, предусматривается установка реакторов атмосферного типа, система газоочистки будет заканчиваться газопромывателем, понижающим температуру газа перед дожимным компрессором с отмывкой от NH3, что позволяет уйти от известных проблем дожигания аммиака [3,4].

Коксозольный остаток после узла ТХП поступает в воздушный котел на сжигание без предварительного охлаждения. В него также поступают для огневого обезвреживания остатки жидкой пиролизной фракции, не использованные в реакторе.

На основании укрупненного теплового расчета основных агрегатов и составления теплового баланса схемы с учетом относительных потоков теплоты из газоподготовительной и газоиспользующей частей найдено соотношение тепловых потоков в зависимости от температуры рабочего тела перед газовой турбиной. Полученные данные позволяют определить расход топлива для обеспечения требуемой температуры рабочего тела перед газовой турбиной. Из этого следует, что при необходимости догрева рабочего тела до высокой температуры (~1300°С и более) расход теплоты с газом становится заметной величиной по отношению к расходу теплоты с цикловым воздухом.

Вместе со снижением теплового потока из воздушного котла j2 снижается поток теплоты с паром (c2) из его парогенерирующей части. Рост потока теплоты из газоохладителя d2 обусловлен соответствующим увеличением расхода топливного газа на догрев циклового воздуха.

На основании соотношения потоков теплоты в тепловой схеме и справочных данных по газовым турбинам, а также оптимизационных расчетов в лицензированном программном пакете Thermoflow построен график КПД нетто гибридной схемы в зависимости от температуры перед газовой турбиной (рис.2).

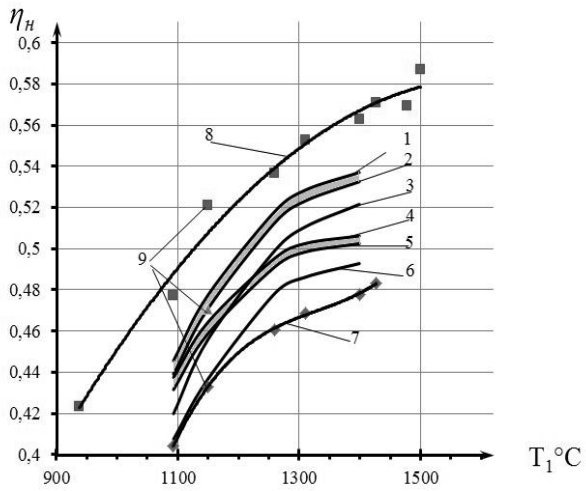

Рис.2 Зависимость КПД нетто от температуры на входе в газовую турбину. 1,2,4,5 – гибридная схема разработки ИЦЭУ-УРФУ соответственно d2=max,r=max, d2=max,r=0; d2=0,r=max; d2=0, r=0; 3 – гибридная схема Foster Wheeler; 6 – гибридная схема ABGC;7 – IGCC типа MHI; 8 – ПГУ с котлом-утилизатором; 9 – точки, полученные при расчете экспериментальной ПГУ; точки на графике получены в расчетном пакете Thermoflow.

Из графика видно, что рассматриваемая гибридная схема по термической эффективности занимает промежуточное положение между ПГУ с КУ и ПГУ-IGCC. При этом актуализация регенеративного цикла газовой турбины повышает КПД нетто на 1-3%. В табл.1 приведено сравнение различных типов энергоблоков.

Таблица 1. Сравнительные экономические оценки различных типов энергоблоков.

Тип ТЭС	К.п.д. энерго блока,%	Уд.затраты на топливо г.у.т./кВт-ч	Уд. кап. за-траты, дол. США/кВт
ПГУ с парокислородной газификацией угля в потоке	45,5/46,5	270/267	4232/2250
ПГУ с паровоздушной газификацией угля в потоке	43,3/44,5	284/276	4182/2100
ПТУ с факельным сжиганием угля и системами серо- и азото- очистки газов	43,0/44,0	286/279	1733/1900
Гибридная ПГУ	47	261	2100
ПГУ на природном газе	58,1/58,0	211/212	700/900

В числителе – данные полученные в результате расчета в программном пакете Thermoflow, в знаменателе – данные [5].

ТОПЛИВНАЯ БАЗА ДЛЯ РЕАКТОРА ТХП В ГИБРИДНОЙ ПГУ

Одним из достоинств гибридных схем является то, что в воздушный котел может поступать энергетическое топливо (уголь2), не проходящее термохимическую подготовку. Однако, специфика ТХК накладывает на выбор топлива для реактора определенные условия.

На ситуационном графике (рис.3) приведены результаты обработки нормативных и некоторых других данных [6-8] по теплоте сгорания топлива Qт перед подачей его в топку (с влажностью Wгот) – кривая 1, теплоте сгорания летучих Qлет (кривая 2), теплоте сгорания смол, Qсмол, выделенных из летучих (кривая 3), а также расчетная кривая 4 затрат тепла Qфиз на нагрев готового топлива до реакционной температуры 900°С, отнесенные на 1 кг готового угля.

Оперируя приведенными данными, нетрудно провести формальный анализ эффективности использования известной топливной базы для работы реактора в гибридной ПГУ.

Наиболее подходящими для упрощенной низкотемпературной конверсии с получением топливного газа для догрева циклового воздуха и конденсированных продуктов для воздушного котла являются топлива со средним выходом коксового остатка (Qкокс ≈ Qлет), занимающие на топливной шкале промежуточное положение (бурые угли с O/C – 0,2-0,4). Топлива с умеренным выходом смол (Qсмол ≈ Qфиз) представляют идеальный вариант для окислительного пиролиза, проводимого за счет тепла, выделяемого при сжигании смолистых продуктов в головной части реактора, как это предложено в [2]. В этом случае из реактора в котел на утилизацию поступают два потока – раскаленный кокс (на дожигание) и подсмольные воды.

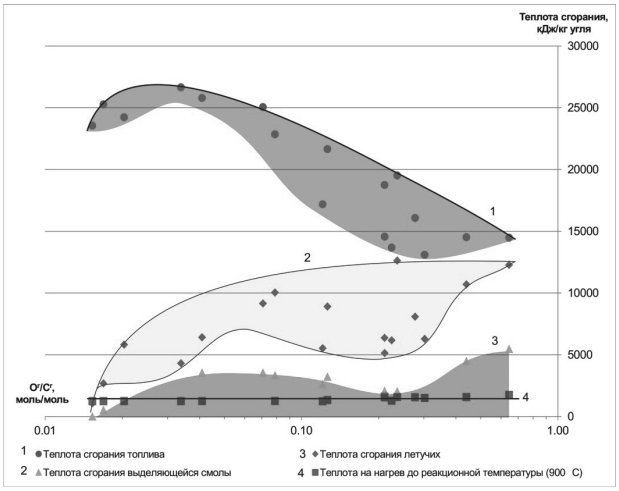

Рис.2 Оценка распределения теплоты сгорания топлива по составляющим термического анализа.

Топлива, дающие низкий выход нелетучего углерода и значительный выход газа и жидких продуктов (торф, древесина, O/C = 0.4-0,6) целесообразно конвертировать по технологии низкотемпературной безостаточной газификации с работой воздушного котла на независимом топливе. Регулируя выход жидких продуктов за счет дополнительного подвода тепла к реактору, можно достичь сухого бессмольного режима.

В случае работы на энергетических топливах с высоким выходом кокса (Qкокса>>Qлет) низкотемпературный реактор, помимо функции подготовки топливного газа для газовой турбины, будет весьма эффективно выполнять работу по облагораживанию основного топлива для воздушного котла, отгоняя топливный азот из коксозольного остатка, как это осуществляется в горелках с предварительной термической подготовкой угольной пыли[8]. В отличие от рассматриваемой гибридной схемы ПГУ, в действующих ныне демонстрационных и коммерческих ПГУ – IGCC, работающих в режиме полной (безостаточной) газификации, конверсию подобных топлив проводят в существенно более капиталоемких высокотемпературных реакторах с парокислородным дутьем.

В рамках разработки проекта реактора ТХК гибридной ПГУ были проведены экспериментальные исследования воспламенения и выгорания низкосортных топлив различного происхождения. В результате исследования было установлено, что воспламенение и выгорание в значительной мере определяются как природой и «предысторией» топливной частицы, так и спецификой протекающих при ее помещении в топку процессов термоподготовки. Наиболее подходящими для низкотемпературных технологий являются топлива, имеющими низкую температуру воспламенения и наибольшую удельную скорость горения. Из ископаемых топлив такими оказались Волчанские бурые угли и их концентраты (ВБ+ с Adaf=68%, ВБ с Adaf=40,5%, ВБ- Adaf=10,8%), энергия активации которых оказывается существенно меньше, чем для близкого по зольности Днепровского бурого угля и для древесного угля. Выбор Волчанского угля (ВБ) марки БЗ обусловлен близостью его свойств с углями Северо-Сосьвинского угленосного района, рассматриваемыми в качестве основного энергетического ресурса для перспективного развития Полярного и Приполярного Урала.

Основной переходный процесс воспламенения этих топлив начинается во внутрикинетической области, а стабилизация горения происходит в диффузионной области. Стабильное горение во внутрикинетической области, свойственное Днепропетровским бурым углям и АШ, наблюдается лишь для высокозольных отходов ВБ+. Режим диффузионного горения, связанный с температурой, зависит от внешних условий. В спокойной среде, либо при высоком уровне теплопотерь, стабилизация происходит во внутридиффузионном режиме. В условиях, приближающихся к адиабатным, имеет место внешнедиффузионный режим. Различие в достигаемой для различных топлив скорости горения определяется, помимо величины внешнедиффузионного сопротивления, развитостью доступной внутренней пористой поверхности, в которой окислитель ведет себя как в свободном пространстве (транспортные поры).

Установленные закономерности и полученные численные значения кинетической и диффузионной составляющих скорости горения углерода ВБ целесообразно учесть при расчете энергоустановок.

Графически результаты экспериментов, выполенные на установках РСК, Пиролиз М и Netztsch приведены на рис.4

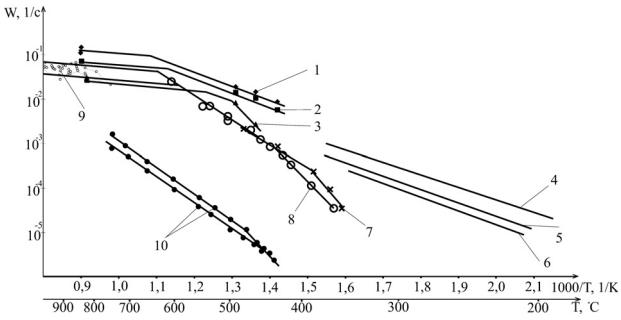

Рис.4 Зависимость скорости взаимодействия углей и коксов с кислородом воздуха от обратной температуры: 1 – (ВБ–); 2 – (ВБ); 3 – (ВБ+); 4, 5, 6 – ВБ (ТГА, 5-20 К/мин); 7 – АБ (Ad=9,4 %, dч=1,25-1,6 мм)[10]; 8 – АБ (Adк =47,3%, p=0,87 МПа, dч=0,4-0,6 мм)[11]; 9 – АБ (Ad=16-18 %, dч=1,0 - 2,5 мм)[12]; 10 – АШ (Adк=46,1%, dч=0,4-0,6 мм) [11].

ТОПЛИВНЫЙ ГАЗ ДЛЯ ГИБРИДНОЙ ПГУ

В зависимости от режима, газы низкотемпературной конверсии на основе воздушного дутья имеют широкий спектр теплот сгорания – от 2-4 МДж/м^3 (, полугазы муфельных растопочных горелок, воздушный генераторный газ) до 8 10 МДж/м^3 (сухие продукты воздушного

окислительного пиролиза) и соответствующих им теоретических температур горения.

На рис.5 приведены результаты расчёта теоретической температуры горения (с учётом диссоциации и начальной температуры) этих групп искусственных газов, сгорающих после прохождения дожимного компрессора в высокотемпературном (1000 °С) воздушном потоке. Для сравнения приведена кривая 2, описывающая зависимость Т0т изначально холодной смеси по известным данным [6].

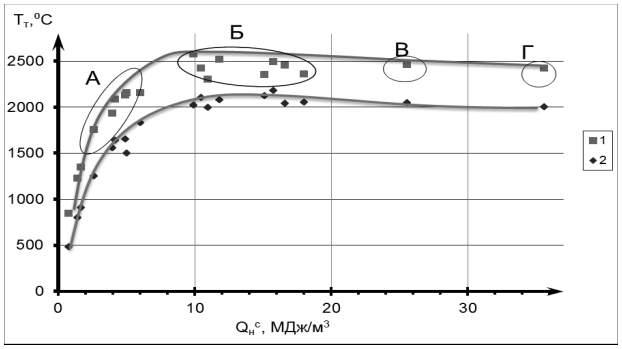

Рис.5 Теоретическая температура горения искусственных газов. 1- для условий гибридной ПГУ; 2 – адиабатная температура $T_{0т}$ горения искусственных газов по [6]. Рабочие участки (характеристики): А – газы воздушной газификации; Б – газы окислительного и безокислительного пиролиза; В – полукоксовые газы; Г – природный газ.Оценка распределения теплоты сгорания топлива по составляющим термического анализа.

Как видно, кривая 1 имеет пологий максимум температуры на уровне 2500 °С в области газов окислительного пиролиза (участок Б) со слабым понижением при увеличении концентрации метана (в пиролизном газе, далее – в полукоксовом газе – участок В и – в природном газе – участок Г). В области воздушных генераторных газов (участок А) понижение температуры более значительно.

Температура горения газов окислительного пиролиза высокая – на уровне газов парокислородной конверсии, что снимает вопросы стабилизации горения и предполагает соответствующий жесткий контроль за выбросами NO_X.

Генераторные газы и полугазы представляют низкоконцентрированную смесь горючих компонент (CO, H_2) в инертной среде (N_2, CO_2, H_2O). Теоретическая температура горения Т0т их низкая (800 – 1600°С), что при обычной технологии сжигания (температура циклового воздуха 400°С, топливного газа 300°С) упрощает контроль за выбросами NO_x, но требует принятия мер по стабилизации горения.

При использовании гибридной схемы температура циклового воздуха перед камерой сгорания повышается до ~1000 °С. В этих условиях проблемы срыва факела не возникает – любой моль горючего (CO, H_2), войдя в контакт с кислородом воздуха, воспламенится и сгорит в режиме наподобие «микродиффузионного» [8], отдавая выделившееся тепло продуктам сгорания и балластному инерту.

Сжигание наиболее бедных газов (типа доменного, ваграночного) будет автоматически протекать в режиме изотермического беспламенного горения типа flameless, для получения которого обычно применяют сложные технологии разбавления высокотемпературными продуктами сгорания [13]. В наших разработках такие газы получают в растопочных горелках и многостадийных воздушных газогенераторах бессмольного безуглеводородного газа [14].

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЬ ГИБРИДНОЙ ПГУ

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°С, а также воздуху и другим газам, используемым в перспективных процессах.

Ставится задача нагреть воздух перед ГТУ до 700-1000°С 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 [15]. 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 CFX) в области теплообмена в трубах со вставками. В результате моделирования было получено распределение температур по длине и радиусу трубы (рис.6).

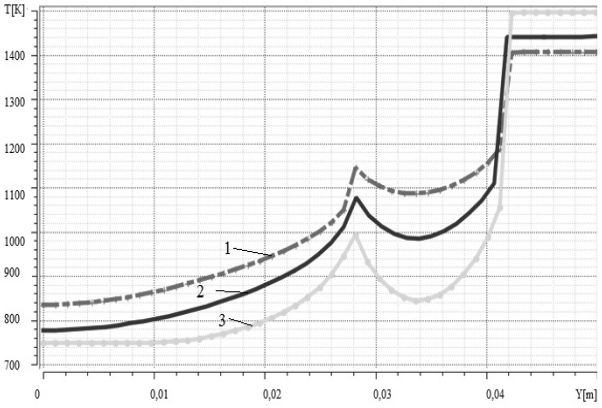

Рис.6 Распределение температур сред в модели трубы со вставкой в радиальном направлении: 1 – X=0.5м, 2 - X=1м, 3 - X=1.5 м.

ВЫВОДЫ

Предложенные угольные ПГУ гибридного типа с воздухонагревателем занимают по термической эффективности промежуточное положение между ПГУ с КУ и ПГУ-IGCC. Построение угольной ПГУ по перспективной гибридной схеме позволяет практически полностью разгрузить узел ТХК от наиболее затратных стадий в подготовке топлива – окисления (газификации) нелетучего углерода, заменить высокотемпературный режим конверсии топлива на низкотемпературный, жидкое шлакоудаление на твердое, перейти с кислородного дутья на воздушное, применить мокрую газоочистку с отмывкой от соединений топливного азота.Основной топливной базой для гибридной ПГУ будут являться как кондиционные энергетические угли, так и прежде всего низкосортные топлива с соотношением Qкокса/Qлет≤1.

Угли, подобные Волчанскому, целесообразно обогащать, высокореакционный малозольный продукт с выходом около 70% углерода использовать для вихревого и факельного сжигания, а низкореакционный высокозольный – сжигания в КС или ЦКС. Это существенно снизит мехнедожог при пылевидном сжигании и позволит утилизировать углерод, содержащийся в сростках. Сопоставление с украинскими энергетическими углями показывает, что реакционная способность высокозольной фракции вполне достаточна для ее эффективного сжигания в псевдоожиженном слое.

Для сжигания имеющего низкую температуру горения низкокалорийного бессмольного газа в высокотемпературном цикловом воздухе возможно применение простых одностадийных схем без контроля эмиссии NOx.

Сжигание среднекалорийного газа, имеющего расчетную температуру горения более высокую, чем метан, следует проводить по отработанной двухстадийной схеме с контролем NOx.

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Состояние и перспективы развития производства нового поколения силикатно-эмалевых покрытий для защиты металлоизделий от коррозии и износа: Сб. докл. научн.-техн. конф. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. с .228
2. Шульман В.Л., Зайцев А.В., Богатова Т.Ф. Развитие угольных парогазовых технологий // Технологии эффективного и экологически чистого использования угля: Сб. докладов международной научно-практической конференции. М.: ОАО «ВТИ», 2009. С. 246-251
3. Ольховский Г.Г., Сучков С.И., Березинец П.А., Епихин А.Н., Крылов И.О., Луговская И.Г., Сомов А.А., Гудков В.Н., Заикин А.А. Разработка отечественной ПГУ с газификацией угля // Теплоэнергетика. 2010. №2. С.19-26.
4. Takeharu Hasegawa (2011) / Developments of Gas Turbine Combustors for Air-Blown and Oxygen-Blown IGCC [Электронный ресурс] // Advances in Gas Turbine Technology. Ernesto Benini (ed.), ISBN: 978-953-307-611-9, InTech. URL: http://www.intechopen.com/books/advances-in-gas-turbine-technology/developments-of-gas-turbine-combustors-for-air-blown-and-oxygen-blown-igcc.
5. Монастырева Т.Н. Технико-экономическая оценка внедрения технологий газификации углей на тепловых электростанциях. /Сборник научных статей «Современная наука». 2011.№3(8)
6. Равич М.Б. Эффективность использования топлива. – М.: «Наука», 1977.
7. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Под ред. Н.В. Кузнецова и др., М.: «Энергия», 1973.
8. Кнорре Г.Ф. Теория топочных процессов. М.-Л.: «Энергия», 1951.
9. Шульман В.Л. Предварительная термическая подготовка топлива как реальный способ технологического и экологического совершенствования пылеугольных котлов // Электрические станции. – 2000. №6. С. 16-19.
10. Буляндра А.Ф., Майстренко И.А. Особенности взаимодействия коксов александрийских бурых углей с кислородом воздуха // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – №3. – 2010. – С.3-8.
11. Майстренко О.Ю. Основні закономірності горіння та газифікації високозольного вугілля в різних модифікаціях киплячого шару: Автореф. дис. … д-ра техн. Наук. – Київ, 1999. – 35 с.
12. Дулиенко С.Г., Косячков А.В., Чернявский Н.В Динамика конверсии днепровского бурого угля в кипящем слое // Экотехнологии и ресурсосбережение. – №5. – 2005. – С.3-12.
13. Yeshayahou Levy. Low NOx Flameless Combustion for Jet Engines and Gas turbine//9th Israeli symposium on Jet Engines and gas turbines. October 7, 2010. Technion. Israel.
14. Рыжков А.Ф., Попов А.В., Рыжков И.В., Силин В.Е. Исследование процессов многозонной газификации биомассы // Горение твердого топлива: Сб. докладов VI Всерос. конф. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006. – Ч.3. С. 126-136.
15. 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)