

УДК 621.311.22.001.57

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТЭС С ТЕХНОЛОГИЕЙ ВИХРЕВОГО СЖИГАНИЯ ТВЁРДЫХ ТОПЛИВ

В.В. Саломатов

Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: aleks@itp.nsc.ru

Создание экологически перспективных ТЭС (ЭПТЭС) – магистральное направление развития мировой и отечественной энергетики. Это, прежде всего, касается угольных ТЭС, так как ресурсы последнего в мире и нашей стране достаточно велики. Уголь и в далёкой перспективе считается стратегическим и наиболее доступным энергетическим топливом. На долю энергетики отводится его низкосортная часть, что при сжигании в существующих топочных устройствах приводит к повышенным экологическим нагрузкам на окружающую среду.

Реализация наивысших энергоэкологических показателей ТЭС достигается в условиях предельного ресурсосбережения [1]. Эта концепция базируется на применении технических систем, основанных на принципах безотходности, замкнутости и др. В рамках такого подхода ТЭС на твёрдом топливе может и должна функционировать как межотраслевой энергоагропромплекс (ЭАПК)

При этом для экологически чистой ТЭС необходимо обеспечить следующие требования по выбросам, (г/нм³): - золы не более – 0,05; окислов серы не более – 0,2÷0,3; окислов азота не более – 0,15÷0,20; неочищенные жидкие стоки должны отсутствовать; доля золы для последующего использования не менее 80% [2].

Ниже рассматривается концепция ЭПТЭС на канско-ачинских углях с замкнутыми системами вредных жидких стоков, золошлакоотходов, тепловых сбросов; низкими показателями по газовым выбросам и др. В качестве основного котельного оборудования выбрана перспективная конструкция парогенератора Н.В. Голованова с вихревой топкой [3]. Для количественной оценки токсичных выбросов NO_x, SO_x, золы уноса и других характеристик в данном топочном устройстве используются экспериментальные данные с опытно-промышленных установок и параметры компьютерного расчёта топочного процесса.

1. Математическое и физическое моделирование топочного процесса в вихревой топке

1.1 Компьютерное моделирование

Разработана пространственная модель топочных процессов. Движение топочной среды описывается на основе Эйлера подхода для газовой и твердой фаз [4,5]. При этом для учета скольжения фаз используется двухскоростное и двухтемпературное представление. Принимается модель течения монодисперсной газовзвеси, когда угольные частицы в процессе химических превращений считаются твердыми сферами постоянного размера в соответствии с гипотезой твердого «золотого каркаса». При этом плотность частицы уменьшается при снижении ее массы в процессе выхода летучих и конверсии углерода.

Для осреднения нестационарных пространственных уравнений переноса импульса, энергии, концентраций компонентов используется метод Фавра для несущего газа [4,5], а

для дисперсной фазы - кинетические уравнения для функции распределения плотности вероятности скорости и температуры частиц в турбулентном потоке. Осредненные уравнения замыкаются к-ε моделью турбулентности, модифицированной для учета влияния дисперсной фазы [6]. Радиационный теплообмен описывается уравнением переноса плотности энергии излучения, основанном на P_1 – приближении метода сферических гармоник для серой, поглощающей, излучающей и рассеивающей двухтемпературной среды [6]. Для реализации модели используется конечно-разностный алгоритм SIMPLEC [5,6]. Уравнение Пуассона для поправок к давлению решается эффективным методом сопряженных минимальных невязок с применением схемы неполной факторизации Н.И. Булеева [6], что существенно сокращает время счета в целом [7].

Результаты вычислительного эксперимента для вихревой топки показали, что предложенная модель успешно объясняет экспериментальные наблюдения. Как показали расчеты, на скорость выхода летучих для частиц размером 90 мкм и менее основную роль при $T < 10^3$ К оказывает кинетический режим реакции, а при $T > 10^3$ К становится важным диффузионный режим. Основная часть летучих успевает выделиться на расстояниях до 0,6 от длины входной горелочной струи и их сгорание в газовой фазе обуславливает интенсивный прогрев и зажигание коксовых частиц.

Температурный профиль претерпевает значительные изменения на границах входной струи и достигает максимального уровня внутри топочной камеры. В камере охлаждения температура потока падает до значений, укладывающихся в диапазон технологических температур на выходе из топки. Основным механизмом подвода тепла в экранные поверхности нагрева является радиационный теплоперенос. При этом отводимая экранными топочными поверхностями тепловая мощность при сжигании канско-ачинских составила до 15% от мощности химического энерговыделения.

Выяснено, что конверсия углерода для частиц до 40 мкм почти полностью происходит в камере горения, а для более крупных частиц (90 мкм и выше) догорание заканчивается в диффузоре камеры сжигания.

Расчет экологических показателей в вихревой топке показал [8], что основную роль в образовании NO_x играют реакции:

- 1) выхода азота летучих в виде HCN, его превращения в NO_3 и затем в NO;
- 2) диссоциации воздуха, дающих до 50% NO, из-за высокотемпературного режима в камере сжигания;
- 3) поглощения NO углеродом коксовых частиц.

Расчетные значения концентраций укладываются в существующие нормативы ПДК, что свидетельствует об экологической перспективности исследуемой технологии вихревого сжигания пылеугольного топлива [8].

1.2. Физическое моделирование

Компьютерные расчеты адаптировались на автоматизированном аэродинамическом стенде с применением следующих диагностических систем: термоанемометр постоянной температуры, тепловизионная техника, визуализация с помощью мелкодисперсных порошков [10]. Исследованы такие важные аэродинамические эффекты вихревой топки как прецессия вихревого ядра, эффект Коанда и др. Выработаны способы эффективного управления структурой течения.

Таким образом, проведенный совместный физический и вычислительный эксперимент по основным теплотехническим и экологическим характеристикам вихревой

топки показал соответствие расчетных данных опытно-промышленным испытаниям. Эти результаты имеют важное значение для разработки научно-технических рекомендаций по оптимизации работы и конструктивным параметрам топки с целями улучшения ее теплоэнергетических и экологических характеристик и повышения эффективности управления котельным агрегатом в целом.

2. Парогенератор с вихревой технологией сжигания

Применение ПГ с вихревой топкой позволяет:

- снизить размеры котельной ячейки;
- варьировать в широком диапазоне топлива (газ, жидкость, уголь);
- улучшить экологию (NO_x - 1,5 ÷ 2 раза, летучей золы - в 2÷3 раза).

Конструкции серийной и экспериментальной вихревой топок для энергоустановок различных мощностей и параметров была разработаны на базе комплекса экспериментальных и научно-исследовательских работ. Исследования проводились на разных типах установок: от гидравлических и воздушно-изотермических моделей, и до опытно-промышленных котлов.

На экспериментальном котле ТПЕ-427 на 500 т/ч пара на Новосибирской ТЭЦ-3 получен положительный опыт для секционной вихревой топки диаметром 6,2 м при сжигании ряда низкосортных топлив сибирских месторождений, в том числе тяжёлых по сжиганию берёзовских углей КАБ. Они показали стабильный выход жидкого шлака при изменении нагрузки от 40 до 100%.

Результаты физического и математического моделирования, экспериментальные и промышленные исследования явились базой для выбора принципиальных конструктивных и режимных параметров для создания новых котлов с вихревыми топками. Прежде всего, это касается геометрических размеров вихревых топок, размеров диффузорной части, уровней температур, скоростей, токсичных выбросов, интенсивности перемешивания, тепловых напряжений внутри топки и других характеристик.

Котлы с вихревыми топками являются высокоэкономичными и надежными устройствами. Применение вихревых топок на паровых и парогазовых ТЭС показывает значительное снижение удельных расходов топлива, габаритных размеров, затрат материалов и снижение времени проектирования и строительства ТЭС.

3. Экологически перспективная ТЭС на сибирских углях в концепции энергоагропромпкомплекса

В результате выполненных исследований разработаны технологические схемы экологически перспективных энергоблоков на твердом топливе на принципах малоотходных и ресурсосберегающих технологий с позиций современных достижений в области энергетики. Техничко-экономический анализ показывает, что затраты на природоохранные технологии компенсируются такими положительными эффектами: снижением ущерба, причиненного выбросами в окружающую среду; прогрессивностью технических решений по тепломеханическому оборудованию; прибылью от реализации продуктов утилизации; полезным использованием сбросного тепла и др.

3.1. Научно-технологические основы создания ЭПТЭС на твёрдом топливе с вихревой технологией сжигания КАУ

Развиваемый подход к созданию ЭПТЭС содержит принципиально новое сочетание технико-экономических и экологических решений.

1. Котлоагрегат создается максимально теплонапряженным, с минимальной металлоемкостью. При таком требовании топочный процесс должен быть высокофорсированным. Этому условию в большей степени отвечает вихревой способ сжигания твёрдого топлива, благодаря которому в камере горения возникают устойчивые энергонапряжённые циркуляционные зоны, которые играют решающую роль в ускорении газификационных и смесеобразовательных процессов, самых медленных в последовательных стадиях сжигания твёрдого топлива. На таких принципах и реализована вихревая топка инж. Н. В. Голованова с ЖШУ.

2. При нейтрализации окислов азота и серы, содержащихся в дымовых газах, применяется система радиационной обработки их с использованием электронно-лучевых установок конструкции ИЯФ СО РАН, при которой окислы азота и серы переводятся в полезный продукт: или готовое минеральное удобрение (смесь сульфата и нитрата аммония при подаче в реакционный объем аммиака), или важнейшую составляющую при производстве жидких минеральных удобрений (смесь азотной и серной кислот при безаммиачном производстве).

3. Очистка промстоков энергоблока осуществляется за счёт тепла дымовых газов, которые охлаждаются в контактных теплообменниках. Для орошения в теплообменнике используется вода промстоков. Подогретая вода затем поступает в установку термического обессоливания (многоступенчатый испаритель мгновенного вскипания), где под вакуумом испаряется и охлаждается. Образовавшийся при этом пар конденсируется, а конденсат подается в контур питательной воды энергоблока. Продувочная вода (рассол) из последней ступени испарения направляется в УГЗ отходов. Таким образом, осуществляется полная нейтрализация промстоков и одновременно решается задача обеспечения подпиточной водой котлов без использования системы химводоочистки.

4. Применяется сухая золоочистка. Основное улавливание мелкодисперсной золы из дымовых газов осуществляется в электрофильтрах. Доочистка дымовых газов после блока электронно-лучевой обработки от смеси сульфата и нитрата аммония и незначительного остаточного количества золы осуществляется в последовательно расположенных электрофильтре и рукавных фильтрах.

5. Способ поджига пылеугольного факела и поддержания горения на пониженных нагрузках – безмазутный. С этой целью применяются плазменное воспламенение и подсветка пылеугольной аэросмеси с использованием плазмогенераторов конструкции ИТ СО РАН.

6. Утилизация низкопотенциального тепла с температурой выше 25°C осуществляется с помощью теплонасосной техники.

Изложенное в пп. 1...6 сочетает в себе решение двух важных народнохозяйственных проблем: создание экологически чистой и максимально экономичной тепловой электростанции как основы развития энергетики и производство минеральных удобрений, строительных материалов и другой продукции наиболее экономичным и экологически чистым способом. В разработке ЭПТЭС реализуется принцип комплексного использования практически всех отходов, который основан на многоотраслевом ЭАПК [9,10]. ЭАПК – это серия сопряженных с теплоэлектростанцией дорстройпромкомбинатов и агропредприятий, позволяющих эффективно использовать отходы ТЭС, производить не только электроэнергию и тепло, но и сырьё для стройиндустрии, металлургии и разнообразную сельхозпродукцию. Рассмотренные теплотехнологии лишь в комплексе ЭАПК проявляют все экологические и экономические преимущества. Нами впервые

[illegible]

1. При высокотемпературном сжигании КАУ в вихревом факеле происходит полное проплавление и усреднение всей массы шлака. Такой шлак может быть непосредственно использован как ценный вяжущий материал в цементном производстве.

Зола используется также в схеме радиационно-химического обезвреживания для нейтрализации смеси кислот с целью получения низкосортных вяжущих или

наполнителей для бетонов. Часть шлака и золы направляется на нужды сельского хозяйства.

2. Эффективнее всего использование зол КАУ в сельском хозяйстве для повышения плодородия почв (их известкование, улучшение агрофизических свойств, внесение комплексов микроэлементов и т.д.), увеличения урожайности сельскохозяйственных культур и сокращения сроков их созревания, создания искусственных почв и компостов для закрытого грунта. Расчёты показывают, что чистая прибыль от применения золы в сельском хозяйстве в зоне Сибири составляет ~11 \$/га. В работе применяется гранулирование золошлаковых смесей (сырцовые гранулы). Для грануляции используются рассолы с АТО, предусматривается их упаривание с использованием тепловых насосов.

3. Наличие источника теплых вод обуславливает формирование вокруг ТЭС крупных агрокомплексов: тепличного хозяйства, птицефабрики, рыбного хозяйства и др. Предлагается использование пруда-охладителя ТЭС в качестве рыборазводного предприятия, что даст существенную прибавку биомассы.

4. Получение обессоленной воды обеспечивается на базе установок мгновенного вскипания. Условно чистые стоки поступают в узел подготовки, где проходят стадии фильтрации, корректировки pH, деаэрации. Подготовленная вода направляется в контур установки. Циркуляционная вода подается в конденсаторы регенеративных ступеней испарителя, нагревается и затем поступает в скруббер. В скруббере путем непосредственного контакта с дымовыми газами циркуляционная вода дополнительно нагревается, а дымовые газы при этом промываются, частично увлажняются, охлаждаются и выбрасываются в атмосферу. Нагретая в скруббере циркуляционная вода поступает в многоступенчатый испаритель мгновенного вскипания разработки Сибирского филиала НПО «Техэнергохимпром», где под вакуумом испаряется и охлаждается. Образовавшийся при этом пар конденсируется на трубках конденсатора и вода дистиллята подается на конденсатоочистку, где дополнительно очищается (при необходимости), а далее подается в контур питательной воды энергоблока. Продувочная вода из последней ступени испарения направляется в УГЗ.

5. Тепловая мощность сбросного низкопотенциального тепла энергоблока мощностью 800 МВт на КАУ составляет около 10^3 МВт. Температура этого сбросного потока тепла в основном невелика – в среднем около 25°C, хотя незначительная часть тепловых потерь имеет относительно высокий потенциал – дымовые газы порядка 5 % и около 5...6 % тепла содержится в стоках, имеющих температуру 30...35°C, таких как продувочная вода (рассол) и вода из системы охлаждения конденсаторов АТО. Это тепло можно использовать эффективно для целей теплоснабжения и теплофикации (приточная вентиляция, прямое калориферное отопление, тепловые завесы) с применением ТНУ. Подробный расчетный анализ привёл к технически обоснованной схеме утилизации такого тепла и выбору типов тепловых насосов для этих целей. Имеется положительный экономический эффект по сравнению с получением необходимого тепла из теплофикационных отборов турбоустановки.

Технико-экономический анализ разработанной технологической схемы ЭПТЭС на КАУ показывает, что затраты на природоохранные технологии компенсируются положительными эффектами: снижением ущерба, причиняемого выбросами и отходами с ТЭС; прогрессивностью технических решений по тепломеханическому оборудованию; прибылью от реализации продуктов утилизации; полезным использованием сбросного тепла. От энергоагропромплекса, который формируется на базе ТЭС, народное

хозяйство получает полезный продукт с прибылью от реализации $\approx 1,3$ млн. \$/год. Кроме того, природе не наносится ущерб от вредных выбросов на сумму около 8 млн. \$/год.

Расчёты приведены в ценах 1990 г.

Список обозначений:

ЖШУ – жидкое шлакоудаление;
ЭПАК – энергоагропромышленный комплекс;
КАУ – канско-ачинский уголь;
АТО – аппарат термического обессоливания;
УГЗ – установка грануляции золошлака.

Литература:

1. Ключников А.Д. Пути экономии энергии в теплотехнологиях. – М: Энергоиздат, 1988.
2. Накоряков В.Е., Бурдуков А.П., Саломатов В.В. Экологически чистая тепловая электростанция на твёрдом топливе. – Новосибирск, Наука, 1990.
3. Вихревая топка/ А.П. Бурдуков, Н.В. Голованов, В.Е. Накоряков, В.В. Саломатов //Авторское свидетельство №1882871, 1992.
4. Modeling the vortex furnace aerodynamics./ A.D. Rychkov, D.V. Krasinsky, V.V. Salomatov, A.W. Keyno // J.Ward. Vol. 2, Espinho-porto, Portugal, 1 – 4 April, 1997.
5. Красинский Д.В., Рычков А.Д., Саломатов В.В. Численное моделирование трёхмерного турбулентного течения с горением пылеугольного топлива в вихревой топке парогенератора// Труды конф. «Использование методов математического моделирования в котельной технике. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 1996.
6. Красинский Д.В., Саломатов В.В. Теплоэнергетика. Физико-технические и экологические проблемы, новые технологии, технико-экономическая эффективность: Сб. научных трудов, вып. 3. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999.
7. Саломатов В.В., Красинский Д.В. Теплоэнергетика. Физико-технические и экологические проблемы, новые технологии, технико-экономическая эффективность: Сб. научных трудов, вып. 4. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.
8. Krasinsky D.V., Salomatov V.V. Proceedings the 4th Korea – Russia International Symposium on Science and Technology. June 27 – 30, 2000, part 1.
9. Саломатов В. В.// Труды международной конференции «Экология – 2000». – М.: МЭИ, 2000.
10. Носков А.С., Пай З.П., Саломатов В. В. Природоохранные технологии на ТЭС и АЭС. Ч. I. Защита атмосферы от вредных выбросов ТЭС и АЭС. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998.
11. Саломатов В. В. Природоохранные технологии на ТЭС и АЭС. Ч. II. Концептуальные основы экологически чистых ТЭЦ на кузнецких углях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.