

Технология циркулирующего кипящего слоя: использование в энергетических установках и новые приложения.

Г. А. Рябов

ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»), г. Москва, Россия

Технология кипящего (КС) и циркулирующего кипящего слоя (ЦКС) давно и широко использовалась в ряде процессов нефтепереработки, химии и металлургии. Например, в США больше половины нефти перерабатывается на установках каталитического крекинга с ЦКС, широко используются такие установки для обжига глинозема при производстве алюминия. Основной характерной особенностью технологии сжигания твердых топлив в кипящем слое является наличие значительного количества инертного материала в топке. Особенностью режима сжигания в циркулирующем кипящем слое (ЦКС) помимо собственно организации контура циркуляции считается тот факт, что скорость газа превышает скорость витания почти всех частиц слоя, т.е. практически все частицы могут быть вынесены из слоя. Именно этот признак является решающим для отличия режимов ЦКС от других режимов псевдооживления или движения частиц в потоке газа (например, пневмотранспорта).

Применительно к энергетике эта технология начала свое развитие в конце 70-х годов прошлого века под влиянием ужесточающихся экологических требований. Основными преимуществами технологии ЦКС являются:

- возможность эффективного сжигания низкокалорийных, высокосолевых топлив, а также топлив с малым выходом летучих, которая определяется стабильной температурой в топке, низким содержанием углерода в слое;
- возможность эффективного (более 90%) связывания оксидов серы путем подачи известняка в топку, при оптимальной температуре слоя около 870 °С и длительном времени пребывания частиц известняка в топке;
- низкие выбросы оксидов азота (менее 200-300 мг/нм³), которые обусловлены низкой и стабильной температурой в топке при организации ступенчатого подвода воздуха;

За рубежом накоплен богатый опыт проектирования и эксплуатации котлов с ЦКС, значительно усовершенствованы конструктивные решения, снижена металлоемкость, повышена экономичность, надежность и увеличен диапазона регулирования.

Использование технологии ЦКС на крупных энергетических блоках.

Ключевыми датами в развитии технологии ЦКС в мировой энергетике являются:

- 1979 год – первый энергетический котел с ЦКС в Финляндии;
- 1985 год – первый котел с ЦКС с промежуточным перегревом пара;
- 1996 год – первый крупный блок мощностью 225 МВт во Франции;
- 2002 год – ввод блока 300 МВт с котлом ЦКС в США;
- 2009 год – пуск блока 460 МВт с суперкритическими параметрами пара в Польше.

В июле 2011г – компания «Фостер-Уиллер» получила заказ на сооружение прямоточных котлов с ЦКС на параметры пара 603 /603 0С для четырех блоков по 550 МВт в Южной Корее с планируемым пуском в 2015 году.

В настоящее время в мире эксплуатируется более 3000 котлов с ЦКС. В Европе наибольший прогресс с внедрением котлов с ЦКС достигнут в последнее время в Польше – более 15 котлов для блоков мощностью более 100 МВт. Из них три блока по 235 МВт и еще

три по 260 МВт. В 2009 году введен в эксплуатацию крупнейший в мире блок мощностью 460 МВт с котлом ЦКС на ТЭС в Логиже.

Китай является самым крупным рынком котлов с ЦКС. Установленная мощность блоков с котлами ЦКС составляет 102 ГВт, из них 1960 котлов с паропроизводительностью 35 – 90 т/час и 1019 котлов с паропроизводительностью от 120 до 1065 т/час [1]. В 2008 году сооружались 12 и проектировались 10 блоков мощностью 300 МВт с котлами ЦКС.

Рост единичной мощности (тепловой) котлов с ЦКС показан на рис. 1 на примере крупнейших котлов с ЦКС компании «Фостер-Уиллер».

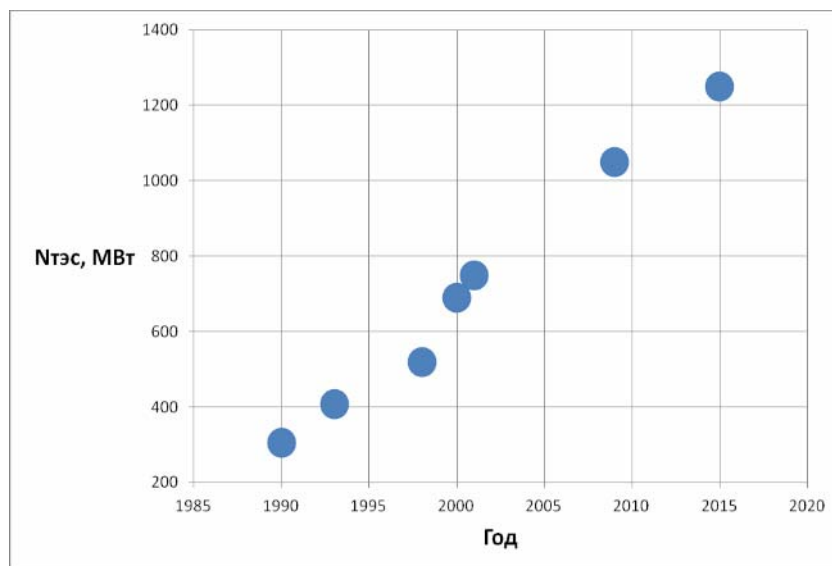


Рис. 1 – Рост единичной тепловой мощности крупнейших котлов с ЦКС компании «Фостер-Уиллер»

Блок мощностью 460 МВт, обеспечивает лучший в мире КПД для блоков с котлами с ЦКС – 43,3 % (рис. 2). Помимо роста параметров пара, увеличение эффективности блоков с котлами ЦКС достигается путем глубокой утилизации тепла уходящих газов, как это сделано на ТЭС в Логиже [2].

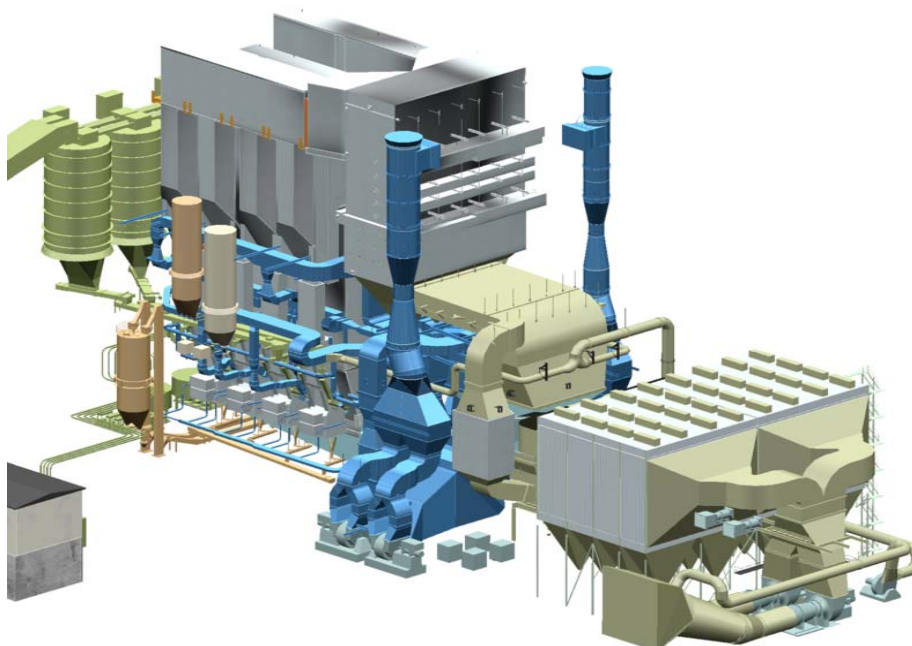


Рис. 2 – Вид котельной установки с ЦКС блока 460 мВт в Польше

При выборе технологии сжигания выполнялось сравнение технико-экономических показателей вариантов пылевого сжигания с азото- и сероочисткой и котла с ЦКС. В результате сравнения оказалось, что котел с ЦКС на 6 % дороже пылеугольного, установка селективной каталитической очистки от оксидов азота (СКВ) увеличивает затраты на пылеугольный вариант на 6 %, а установка сероочистки – еще на 21 %.

В связи с вопросами глобального изменения климата и требованиям к увеличению доли возобновляемых топлив при производстве электроэнергии на новой ТЭС в Лагидже планируется сжигать биомассу, кроме того, предусмотрен вариант перехода к кислородному сжиганию с сепарацией CO_2 .

Следующим шагом является проектирование еще более мощного котла с лучшим КПД и низкой эмиссией вредных веществ. В [3] приведены результаты разработок компании “Фостер-Уиллер”. Наиболее предпочтительным представляется вариант блока 800 МВт, как реальный для внедрения в ближайшее время. Параметры перегретого пара: расход - 569 кг/с, давление - 31,5 МПа, температура - 604 °С. Параметры пара промежуточного перегрева 487 кг/с, 4,41 МПа, 621 °С.

Значительные работы, направленные на снижение капитальных и эксплуатационных затрат, проводятся в Китае. Благодаря использованию технологии с низкой массой слоя (сниженным давлением под решеткой с 18 – 27 кПа до около 10 кПа) удалось уменьшить затраты электроэнергии на собственные нужды более чем на 1 % при том же КПД котла. По данным [4] это дает экономию около 7 млрд. тонн угля и снижение выбросов CO_2 на 35 млн. тонн в год для всех крупных блоков с ЦКС в Китае. Кроме того, повышается надежность работы за счет снижения эрозии обмуровки и защитных поверхностей труб.

В Китае, США, Западной Европе и Юго-Восточной Азии строятся и успешно эксплуатируются котлы всех модификаций, причем преимущества той или иной технологии с учетом всех аспектов строительства, эксплуатации и местных условий не являются очевидными. В ближайшей перспективе при сооружении новых ТЭС с котлами ЦКС какая-либо технология не получит преимущественного развития. Самые крупные котлы с ЦКС поставлены компаниями “Фостер-Уиллер” и “Альстом”. В последние 3 года резко возросло количество котлов с ЦКС по технологии компании «Бабкок-Вилькокс» - в 2011 году пущены 15 котлов, из них 11 в Индии, которая становится быстрорастущим рынком для технологии ЦКС.

Опыт использования котлов с ЦКС для сжигания сланцев в Эстонии показал ряд преимуществ этой технологии по сравнению с пылевым сжиганием [5]. Существенно увеличился коэффициент полезного действия энергоблоков, при номинальной нагрузке 215 МВт он составил 35-36 % вместо 29 – 30 % при пылевидном сжигании. Вышел на проектную нагрузку блок № 4 Старобешевской ТЭС, который обладает наилучшими экономическими характеристиками среди блоков 200 МВт в Украине и обеспечивает выбросы оксидов серы и азота менее 200 мг/м³. В настоящее время сооружается блок № 9 мощностью 330 МВт на Новочеркасской ГРЭС. Поставщиком котла с ЦКС для него является ОАО «ЭМАльянс», инжиниринг и значительная доля поставки выполняется компанией «Фостер-Уиллер». Пуск блока намечен на 2014 год. Опыт сооружения и пуска этого блока создадут условия для широкого внедрения технологии ЦКС в России.

2 Научное обоснование отечественного метода расчета топчного контура котла с ЦКС

Основное отличие котла с ЦКС от традиционного пылеугольного заключается в особенностях гидродинамики и теплообмена в топке, наличии системы улавливания и возврата. Начиная с 1989 г. в ОАО «ВТИ» начались систематические экспериментальные и расчетно-аналитические исследования по научному обоснованию использования технологии ЦКС. В этих работах принимали участие Институт проблем энергосбережения АН Украины (г. Киев), КазНИИ Энергетики (г. Алма-Ата), Уральский политехнический институт (г.

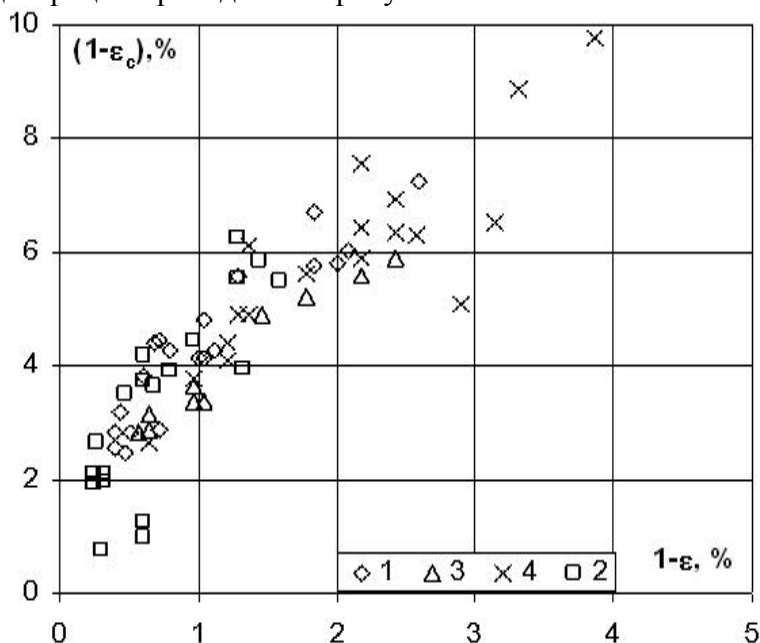
Екатеринбург), Институт теплофизики СоРАН (г. Новосибирск), Московский энергетический институт и другие организации. За это время в ОАО «ВТИ» была создана экспериментальная база с двумя крупными аэродинамическими стендами и огневой установкой. Наибольшее внимание уделялось изучению вопросов гидродинамики топочного контура и тесно связанных с ними вопросов теплообмена, улавливания и возврата частиц, а также смешения вторичного воздуха с сильно запыленным потоком.

Отметим два аспекта: исследования, направленные на взаимосвязь теплообмена и гидродинамики пристенной зоны и особенностей движения в опускных системах и пневмозатворах. Полное описание и вывод расчетных зависимостей для конвективно-кондуктивного теплообмена приведены в [6], [7]. Новыми подходами в предложенных моделях является учет конвективного теплообмена при низких концентрациях потока по обычным зависимостям для конвекции при продольном омывании поверхностей нагрева и расчет контактного теплообмена по объемной концентрации в пристенной зоне.

Разработанная методика расчета конвективно-кондуктивного теплообмена [6] учитывает конвективную теплоотдачу (в зависимости от режима движения), теплообмен при соударении со стенкой и контактное сопротивление, которое существенно только при больших концентрациях потока ($>300 \text{ кг/м}^3$). При этом в качестве определяющей принята объемная концентрация в непосредственной близости от стен ($1-\varepsilon_c$). Для подтверждения положений разработанной модели были определены значения концентраций в пристенной зоне на основе опытных данных о локальном теплообмене при значениях объемных концентраций, характерных для надслоевого пространства котлов ЦКС (0,2-2 %). Объемная концентрация частиц в пристенной зоне была определена на основе данных по теплообмену

$$\frac{1 - \varepsilon_c}{1 - \varepsilon} = 1 + 0,188 \cdot (1 - \varepsilon)^{-0,61} \quad (1)$$

Результаты этих расчетов в виде зависимости объемной концентрации в пристенной зоне от средней концентрации приведены на рисунке 3.



1 – песок 230 мкм нижний датчик, 2 – песок 230 мкм верхний датчик, 3 – анионит 700 мкм, 4 – анионит 550 мкм
Рис. 3 – Результаты расчета объемной пристенной концентрации ($1-\varepsilon_c$) по данным исследований теплообмена

Исходя из анализа структуры потока в пристенной зоне можно считать, что при высоких объемных концентрациях (переходная зона и турбулентный кипящий слой) концентрация в пристенной зоне близка к средней по сечению. При уменьшении средней

концентрации уменьшается ширина пристенной зоны, ухудшается перемешивание по сечению и концентрация в пристенной зоне возрастает по отношению к средней.

Работа системы возврата уловленной в сепараторах золы во многом определяет надежность работы котла ЦКС. Обычно система возврата состоит из вертикального стояка, пневмозатвора и короткой точки возврата золы в топку. Важным является правильный выбор размеров (диаметр, высота) стояков и режимов псевдоожижения. Визуальные наблюдения за движением материала в стояке свидетельствуют о том, что в его нижней части происходит движение в плотной фазе, а выше уровня слоя в разбавленной фазе. В ряде опытов на песке (при низком уровне слоя в стояке и большой массе песка в топке) наблюдался скачкообразный режим движения с возникновением пузырей и проскоком газа вверх. Границы предельных режимов, при которых возникают крупномасштабные пульсации, могут быть оценены с помощью уравнений движения по контуру циркуляции:

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{mf} \cdot H_c \approx H_3 \cdot (1 - \varepsilon_3) \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g + \Delta P_{\text{вт}} + \Delta P_{\text{ц}} \quad (2),$$

где $\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{mf}$ - градиент давления в стояке при параметрах минимального ожижения, Па/м; H_c и H_3 - высота уровня в стояке и высота затвора до кромки перелива, м; $\Delta P_{\text{вт}}$ и $\Delta P_{\text{ц}}$ - перепад давлений в верхней части топки (над точкой возврата золы) и сопротивление циклона, Па.

Нормальным считается течение при котором вес столба материала в затворе $H_3 \cdot (1 - \varepsilon_3) \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g$ равен или несколько превышает перепад давлений в нижней части топки $\Delta P_{\text{н}} = \Delta P_{\text{т}} - \Delta P_{\text{вт}}$, что обеспечивает отсутствия прорыва газа из топки в затвор и стояк. В результате предельный уровень слоя в стояке определяется по формуле:

$$(H_c)_{\text{пр}} = \frac{\Delta P_{\text{т}} + \Delta P_{\text{ц}}}{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{mf}} \quad (3)$$

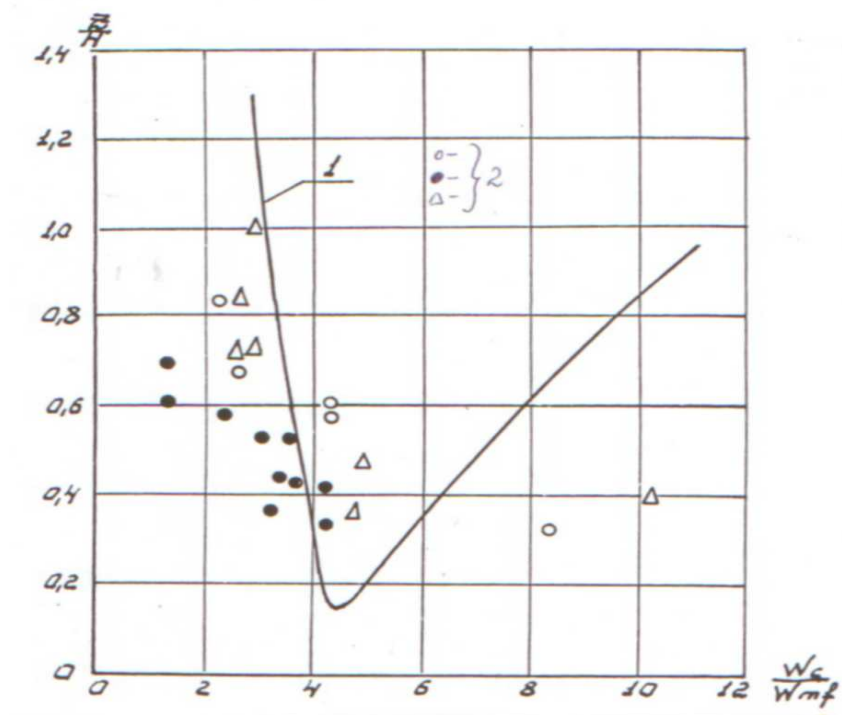
Для условий работы стенда эта величина составляла от 0,15 м до 0,5 м (увеличивается с ростом массы слоя и снижением размера частиц). Для промышленных котлов с ЦКС предельный уровень равен 2-3 м. В [8] считается необходимым иметь, по крайней мере, двукратный запас высоты стояка.

Анализ уравнения (3) показывает, что снижение уровня слоя при постоянных $\Delta P_{\text{вт}}$ и $\Delta P_{\text{ц}}$ может быть достигнуто путем увеличения аэрации, что приводит к росту $\frac{\Delta P}{L}$.

Опытные данные показали, что небольшое изменение расхода воздуха в стояк приводит к существенному изменению уровня в стояке, тогда как влияние подачи воздуха в затвор на уровень слоя в стояке не столь значительно. Целесообразным представляется режим работы, когда небольшой расход воздуха постоянно подается в стояк, а функции "тонкого" регулирования режима осуществляются за счет изменения подачи воздуха в затвор.

На рисунке 4 приведена обобщающая зависимость относительной высоты слоя ($H_{\text{сл}}/H_{\text{ст}}$) от относительной скорости воздуха в стояке ($W_{\text{ст}}/W_{\text{mf}}$). Там же нанесена аналогичная зависимость [9], которая указывает, что при скорости воздуха, равной примерно пяти скоростям минимального псевдоожижения (W_{mf}) достигается минимум относительной высоты слоя. При скорости менее $4 W_{\text{mf}}$ относительный уровень материала в стояке возрастает с уменьшением скорости. При скорости воздуха более $6 W_{\text{mf}}$ этот

уровень материала возрастает с увеличением скорости. Это иллюстрирует факт смены режимов течения, а именно, при низких скоростях – опускное движение в плотной фазе с пузырями воздуха, движущимися вниз, а при высоких скоростях – опускное движение псевдооживленных частиц с пузырями воздуха, движущимися вверх.



1 – опытные данные [9]; 2 – опытные данные ОАО «ВТИ»

Рис. 4 - Зависимость относительной высоты слоя в стояке от относительной скорости воздуха (подача воздуха в стояк)

Исходя из рис. 6 можно сделать важный практический вывод о необходимости поддержания уровня слоя в стояке не более 0,4 от его высоты при ограничении скорости воздуха на псевдооживление в стояке порядка 3-6 W_{mf} . В рекомендуемых режимах пропускная способность стояка достигала 1800 т/ч·м² (большие значения не были получены по причине перегрузки циклона). Для расчета диаметра стояка можно рекомендовать значение опускной скорости материала $\approx 0,1$ м/с.

В [10] на основе предположения о движении материала в стояке с градиентом давления, определяемым по формуле Эргана, и линейной зависимости порозности в диапазоне минимального псевдооживления и вибрационного слоя ([9]) получена формула для относительной скорости материала и порозности при измеренном градиенте давлений

$\frac{\Delta P}{L}$ в стояке:

$$V_R = W_{\text{ч}} - W_{\text{г}} = \frac{G_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ч}} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot F_{\text{с}}} - \frac{Q_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}} \cdot \varepsilon \cdot F_{\text{с}}} \quad (4),$$

где $W_{\text{ч}}$ и $W_{\text{г}}$ – скорости частиц и газа, м/с; $G_{\text{ч}}$ и $Q_{\text{г}}$ – расход частиц и газа, м³/с; $F_{\text{с}}$ – сечение стояка, м².

$$\left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{\text{с}}) = \frac{\frac{\Delta P}{L}}{\left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{\text{mf}}} \cdot \left(\frac{1 - \varepsilon_{\text{mf}}}{\varepsilon_{\text{mf}}} \right)^2 \cdot (\varepsilon_{\text{mf}} - \varepsilon_{\text{с}}) \quad (5)$$

Сравнение опытных данных по относительной скорости частиц, определенных по формуле (4), и видимой скорости материала показывает, что в большинстве режимов относительная скорость ниже видимой скорости материала. Это означает, что газ движется в направлении движения материала (вниз). При скачкообразном режиме относительная скорость значительно выше видимой, что свидетельствует о подъемном движении воздуха. Граница перехода от одного режима к другому примерно соответствует режиму с градиентом давления близким к расчетному по параметрам минимального псевдоожигения.

Таким образом, результаты работы заложили основы отечественных методов проектирования систем возврата котлов с ЦКС [11]. В нашем подходе к конструкторскому расчету котла с ЦКС, также как и известной программе CFBCAD [12], применяется метод экспертной оценки и выбора ряда параметров (недожог, температура на выходе из топки, избыток воздуха, доля первичного воздуха, доля золы уноса и другие) в зависимости от вида топлива и модификации технологии ЦКС. Эти рекомендации основаны на результатах опытного сжигания топлив и зарубежном опыте эксплуатации котлов с ЦКС. В разработках использовались данные УПИ, института угольных технологий НАН Украины, включая недавние работы [13, 14], в которых показаны возможности и условия эффективного сжигания низкорекреационных топлив в ЦКС. Метод расчета выгорания топлива, учитывающий, по крайней мере, в первом приближении эти сложные процессы был разработан в [15] как применительно к стационарной задаче, так и в нестационарной постановке. Также предложены рекомендации и зависимости для оценки экологических показателей и определения расхода известняка.

Общий подход к расчету котла базируется на рекомендациях нормативного метода теплового расчета паровых котлов. Расчеты, выполненные в соответствии с указанными методиками, показали возможность определения основных характеристик проектируемых котлов и удовлетворительную сходимость данных поверочного расчета.

3 Новые применения технологии ЦКС для процессов улавливания CO₂.

Важное значение придается разработкам так называемых полигенерирующих систем с несколькими аппаратами кипящего (КС) или циркулирующего кипящего слоя, в которых происходят процессы газификации (пиролиза) и сжигания с одновременным получением целевых продуктов (например, ценных смол) при очистке генераторного газа и получения жидких моторных топлив [16].

На рис. 5 дана схема основных элементов полигенерирующей системы, в которой объединены процессы пиролиза, газификации и сжигания при высокой эффективности конверсии топлива, низких вредных выбросах и умеренных инвестициях. Такая схема считается наиболее приемлемой для установок небольшой и средней мощности с выработкой электроэнергии, тепла и побочных продуктов.

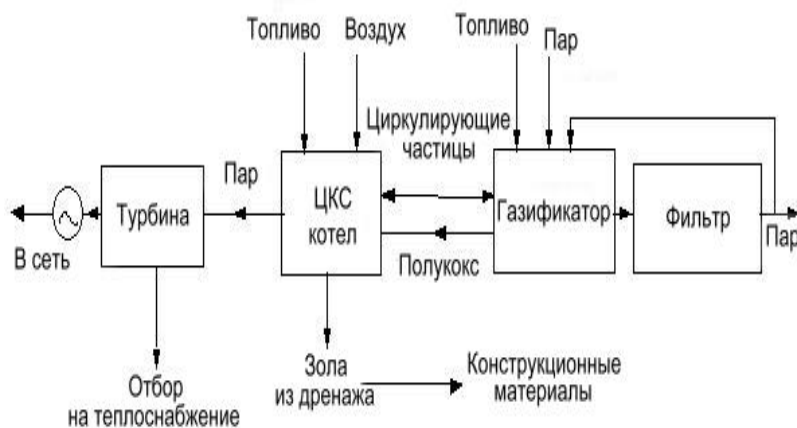


Рис. 5 – Типичная схема полигенерирующей системы

В настоящее время в Китае сооружается крупная установка мощностью 150 МВт. ОАО «ВТИ» имеет соглашение о научной кооперации с Шеньянским Университетом на исследование гидродинамики связанных реакторов на собственной холодной модели и разработкам в области высокотемпературной очистки от частиц, финансируемое китайской стороной.

Так как сложности с улавливанием CO_2 в значительной степени связаны с его низкой концентрацией в дымовых газах, альтернативой при сжигании топлива может служить использование в качестве окислителя кислорода вместо воздуха. При этом, содержание CO_2 в дымовых газах становится более 90 % при небольшом количестве неконденсирующихся газов. Применительно к технологии ЦКС становится возможным уменьшение потоков газов рециркуляции могут оказывать существенное влияние на капитальные и эксплуатационные затраты систем газов рециркуляции для установок кислородного сжигания с ЦКС, по сравнению с установками факельного сжигания. Преимуществом технологии ЦКС также является способность сжигания широкой гаммы топлив, включая биомассу и отходы производств.

В работе [17] была проведена оценка возможности перевода котла Пп-1000-25-585 с ЦКС на кислородное сжигание топлива в предположении о неизменности конструкции поверхностей нагрева, а также тепловой мощности и параметров назначения котла. Установлено, что в такой постановке принципиально возможно обеспечить работу котла с концентрациями кислорода в окислителе (кислород + газы рециркуляции) в диапазоне оптимальных режимов работы с $\text{O}_2=24\div32\%$ об. В настоящее время в ВТИ сооружается лабораторная установка кислородного сжигания тепловой мощностью около 10 кВт.

Получение концентрированного потока углекислого газа может быть достигнуто с помощью новой технологии сжигания топлива – так называемого сжигания в химическом цикле. Суть этой технологии сводится к такой организации процесса горения, когда переносчиком кислорода к топливу является не воздух, а оксид металла (рис. 6). Последний при взаимодействии с топливом в топливном реакторе восстанавливается до металла (или более низкого оксида) с образованием CO_2 и водяного пара. После этого металл окисляется в специальном реакторе, и получившийся оксид вновь направляется в цикл. Выходящие из топливного реактора газы после конденсации водяного пара представляют собой практически чистый CO_2 , который может быть направлен на захоронение или утилизацию.

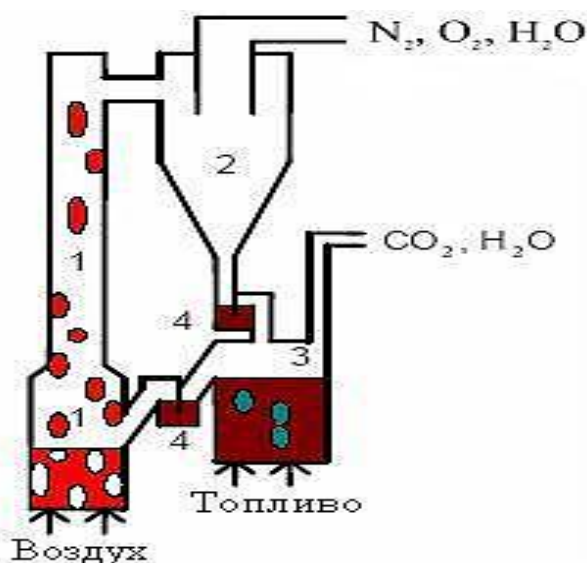


Рис. 6 - Схема процесса сжигания газообразного топлива в химическом цикле.

1 – окислительный (воздушный) реактор, 2 – циклон, 3 – восстановительный

Активные исследования ведутся в области газификации с использованием химических циклов, а также применения химических циклов с реакторами кальцинации и карбонизации для получения чистых потоков CO_2 . На рисунке 7 приведена схема пилотной установки для сжигания природного газа (продуктов газификации) в химических циклах.

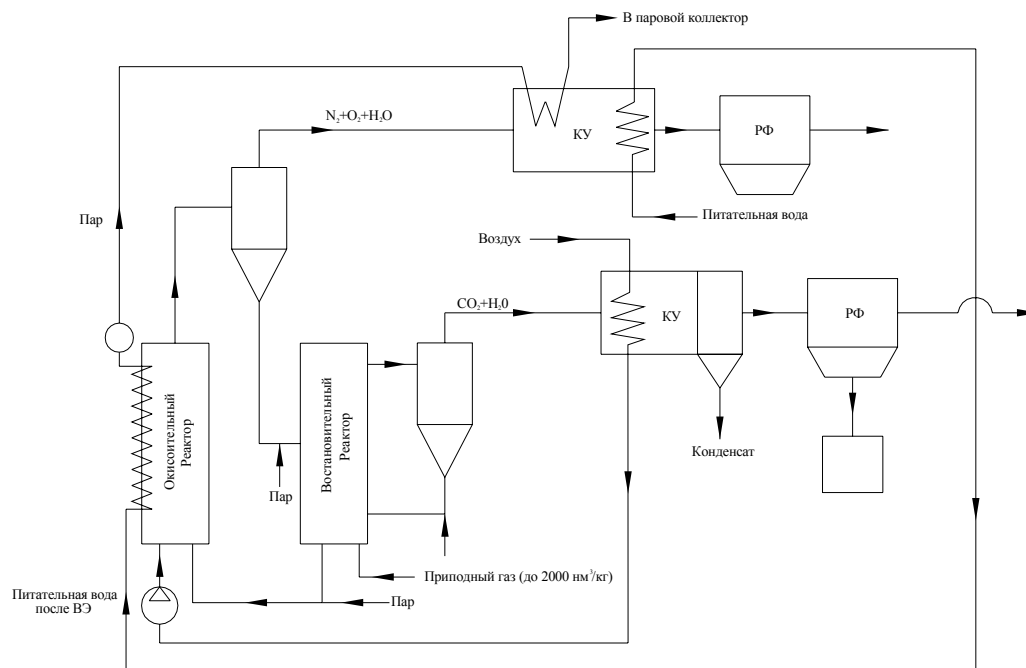


Рис. 7 - Схема пилотной установки для сжигания природного газа (продуктов газификации) в химических циклах

Выполнены также экономические оценки затрат на улавливание и захоронение CO_2 для пилотной и промышленной установок, результаты которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Оценки затрат на улавливание, транспорт и захоронение тонны CO_2

№ пп	Установки	Затраты на улавливание CO_2 , евро/т	Затраты на транспорт CO_2 , евро/т	Затраты на захоронение CO_2 , евро/т	Суммарные затраты, евро/т
1	Пилотная установка 100 МВт	20	5 - 7	3 - 5	28 - 32
2	Промышленная установка	12 - 15	3 - 5	0,7 - 3	15,7 - 23

Для промышленных установок с сжиганием газа в химических циклах можно ожидать увеличение инвестиций на 20 – 30 %, рост себестоимости электроэнергии на 30 - 40 % и снижение КПД на 4 – 8 %. Необходимо учесть и капитальные затраты на удорожание всей энергетической установки, однако, их значения будут меньше, чем при ряде других методов сепарации CO_2 , что позволяет оптимистично смотреть на дальнейшее развитие технологии сжигания топлив в химических циклах. При использовании химических циклов сжигания топлив удастся достигнуть удельных затрат на уровне 10 евро за 1 тонну CO_2 . Эта величина в два раза ниже, чем предполагаемые для других способов сепарации CO_2 . При этом достигнутые на стендовых установках значения полноты улавливания CO_2 (98 ÷ 99 %) являются наилучшими по сравнению с рядом других технологических решений.

Еще более существенными представляются преимущества технологии сжигания топлив в химических циклах с позиции изменения КПД выработки электроэнергии. КПД циклов с очисткой дымовых газов снижается для ПГУ примерно на 18 % от достигнутого без

сепарации CO_2 , а для угольных блоков – на 30 %, что составляет в абсолютных значениях примерно $10 \div 13$ %. При использовании внутрицикловой газификации угля КПД снижается примерно на 10 % (с 46 % до 36 %). В системах с кислородным сжиганием КПД уменьшается на $7 \div 8$ %. Для разрабатываемых систем с сжиганием топлив в химических циклах применительно к схемам с ПГУ КПД снижается с 57 % до 52 %, а при сжигании угля – с 45 % до 41,5 %. Такое небольшое снижение КПД связано с отсутствием затрат на получение кислорода и потерь на рециркуляцию CO_2 или потерь в системах очистки газов.

Исследования в области использования различных систем с химическими циклами за последние 5 лет вышли на уровень создания небольших пилотных установок и разработки демонстрационных установок. Они ведутся очень интенсивно во многих странах, так как в перспективе возможно достигнуть удельных затрат на уровне 10 евро за 1 тонну CO_2 . Эта величина в два раза ниже, чем предполагаемые для других способов сепарации CO_2 . Научный задел отечественных разработок в этой области уже имеется. ВТИ совместно с НИФХИ им. Л. Я. Карпова, РГУ нефти и газа и ОАО «Подземгазпром» проводит работы по исследованиям сжигания в химических циклах и захоронения CO_2 , финансируемых по контрактам с Минобрнаукой РФ [18].

4 Научные проблемы различных способов применений технологии ЦКС.

Одной из важных задач применительно к энергетическим котлам с ЦКС является исследование новых элементов топочного контура, позволяющих повысить надежность и снизить металлоемкость и затраты электроэнергии на собственные нужды. Эта задача требует исследований гидродинамики и сепарации частиц. Важным является исследование влияния компоновки котла (трехмерная задача) на показатели гидродинамики. Другой задачей является исследование систем возврата золы, снижения эксплуатационных затрат и повышение надежности. Разработка новых конструкций зольных теплообменников также является актуальной задачей.

Применительно к сжиганию различных видов биомассы и отходов производств важным является исследование процессов агломерации слоя, загрязнений и коррозии поверхностей нагрева. В оптимизации нуждается и комплекс взаимосвязанных процессов образования и подавления вредных выбросов при минимальной добавке известняка. Исследование синергетических эффектов совместного сжигания биомассы и углей является одной из наиболее актуальных задач.

Важное значение придается разработкам так называемых полигенерирующих систем с несколькими аппаратами кипящего или циркулирующего кипящего слоя, в которых происходят процессы газификации (пиролиза) и сжигания с одновременным получением целевых продуктов при очистке генераторного газа и получения жидких моторных топлив. В Китае сооружается крупная установка мощностью 150 МВт. ОАО «ВТИ» имеет соглашение о научной кооперации с Шеньянским Университетом на исследование гидродинамики связанных реакторов на собственной холодной модели и разработкам в области высокотемпературной очистки от частиц, финансируемое китайской стороной.

Новые направления применения технологии ЦКС для улавливания CO_2 нуждаются в целом комплексе исследований теплообмена и гидродинамики. Например, при сжигании в среде кислорода с рециркуляцией CO_2 важно определить изменение лучистого теплообмена по сравнению с традиционной топочной средой. Для различных систем газификации и сжигания топлив в химических циклах крайне важны вопросы теплообмена при наличии частиц оксидов металлов, гидродинамики связанных систем (опускное движение, пневмозатворы, распределение потоков в реакторах), смешения и разделения потоков частиц с различными свойствами (зола и оксиды металлов).

Литература

- 1 Li J. F., Hao J. Y. 6 Statistics and Analysis of Circulating Fluidized Bed Boiler in China. Power Technology. 2009 (10) pp 70-74/
- 2 A. D. Goral, Łagisza 460 MWe Supercritical CFB – Design, Start-up and Initial Operation Experience, Foster Wheeler Energia Polska, Presentation on Coal-Gen- Europe, September 2009, Katowice, Poland.
- 3 S. J. Goidich, Z. Fan, O. Sippu, A. C. Bose, Integration of ultra-supercritical OUF and CFB boiler technologies, Proc. of 19-th Int. Conf. on FBC, May, 21-23, 2006, Vienna, Austria.
- 4 H. Yang, G. Yue, H. Zhong and J. Lu, Update design and operating experience of CFB boilers with energy saving process in China, VGB PowerTech 7/2011, pp 49-53.
- 5 Loosaar, H. Arro, D. Neshumayev, K. Plamus, A. Ots, T. Parve, T. Pihu, A. Prikk, P. Rushelyuk, Firing Estonian oil shale fuel in CFB boilers, Proc of Int. Conf. CFB9, 13-16 May 2008, Hamburg, Germany, pp 601-606.
- 6 Трухачев С.Н., Рябов Г.А. Инженерная методика расчета теплообмена к настенным поверхностям нагрева в топке с ЦКС. Минский международный форум по теплообмену. ММФ-4, г. Минск, май 2000 г., том VI, стр.24÷33.
- 7 Фоломеев О.М., Трухачев С.Н., Рябов Г.А. Исследование гидродинамики и теплообмена применительно к условиям работы надслоевого пространства котлов с циркулирующим кипящим слоем., Теплоэнергетика №10, 2000 г.
- 8 Chong I.O., O'Dea D.P., Leung L.S. et al. Design of standpipe and non-mechanical V-valves for a circulating fluidized bed. 3-rd Int. Conf. on CFB Technology, Pergamon Press, 1988.
- 9 Knowlton T.M. Non-mechanical solid feed and recycle devices circulating fluidized beds. 3-rd Int. Conf. on CFB Technology, Pergamon Press, 1988.
- 10 Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, Д.А. Шапошник, Исследование систем улавливания и возврата на установках с циркулирующим кипящим слоем, Теплоэнергетика, № 8, 2002г.
- 11 Рябов Г. А., Фоломеев О. М., Работы ОАО «ВТИ» по научному обоснованию расчета топочного контура котлов с циркулирующим кипящим слоем, Теплоэнергетика, № 6, 2011г.
- 12 Lafanechere L., Basu P., Jastin L., The effect of steam parameters on the size of the size and configuration of CFB boiler, Proc 13th Int Conf on FBC, Asme, Orlando, Florida, 1995.
- 13 Ю. П. Корчевой, А. Ю. Майстренко, Н. В. Чернявский и др., Сжигание углеродосодержащей золы уноса антрацитовых ТЭС в циркулирующем кипящем слое, Экологические и ресурсосбережение, № 1, 2008, стр. 3 – 12.
- 14 А. Ю. Провалов, Сжигание отходов углеобогащения в циркулирующем кипящем слое, автореферат диссертации на соискание звания кандидата технических наук, Киев, ИУЭ НАН Украины, ноябрь 2008.
- 15 Кадников Б.Л., Давыдов Н.И., Рябов Г.А., Шмуклер Б.И. Моделирование физико-химических процессов в котлах с циркулирующим кипящим слоем. Теплоэнергетика, №5, 1994, стр. 64÷70.
- 16 Г. А. Рябов, К. В. Ханеев, Применение полигенерирующих систем для повышения эффективности использования твердых топлив, Энергетик, № 11, 2010 г.
- 17 В. М. Супранов, Г. А. Рябов, Д. А. Мельников, Исследование возможности и целесообразности работы котла Пп-1000-25-585 с циркулирующим кипящим слоем в режиме кислородного сжигания топлива, Теплоэнергетика, № 7, стр. 56 – 64.
- 18 Г.А. Рябов, О. М. Фоломеев, Д. С. Литун, Д. А. Санкин, Сепарация CO₂ с использованием химических циклов сжигания и газификации топлив, Теплоэнергетика. № 6, 2009 г.