

УДК 621.438:621.311.22

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИРКУЛИРУЮЩЕГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Рябов Г.А., Фоломеев О.М., Санкин Д.А., Мельников Д. А.

*ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени
теплотехнический научно-исследовательский институт», Москва*

Технология сжигания твердых топлив в ЦКС начала свое развитие применительно к энергетическим установкам в конце 70-х годов прошлого века под влиянием ужесточающихся экологических требований. Хорошо известны основные преимущества технологии ЦКС, которые определяются длительным временем пребывания частиц в реакционной зоне за счет высокой кратности циркуляции, стабильной и относительно низкой температурой в топке при ступенчатой подаче воздуха, оптимальной температурой для связывания оксидов серы известняком.

К недостаткам технологии ЦКС относятся усложнение конструкции котла, наличие большой массы футерованных элементов и длительный пуск из «холодного» состояния, повышенные расходы на собственные нужды за счет использования высоконапорных вентиляторов.

1 Современное состояние и развитие технологии ЦКС в энергетике

Еще 10–15 лет назад считалось, что котлы с ЦКС в основном пригодны для промышленных установок и энергетических установок средней мощности. Однако, с середины 90-х годов положение резко изменилось. На рис. 1 показан рост единичной тепловой мощности котлов с ЦКС на примере крупнейших котлов с ЦКС компании «Фостер-Уиллер». В июле 2011г – компания «Фостер-Уиллер» получила заказ на сооружение прямоточных котлов с ЦКС на параметры пара 603 /603 °С для четырех блоков по 550 МВт в Южной Корее с планируемым пуском в 2015 году.

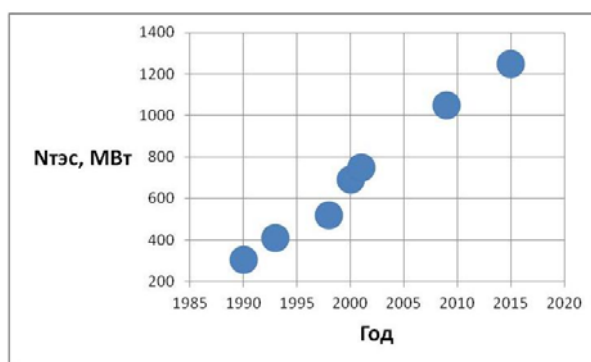


Рис. 1. Рост единичной тепловой мощности крупнейших котлов с ЦКС компании «Фостер-Уиллер»

Китай является самым крупным рынком котлов с ЦКС [1]. 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. В настоящее время, число работающих котлов с ЦКС в Китае приближается к 3000, включая 32 блока по 300 МВт, еще 50 блоков по 300 МВт либо уже находятся в состоянии строительства, либо в скором времени планируется начать их создание. 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.

Ранее бытовало мнение, что котлы с ЦКС не приспособлены к работе на повышенных параметрах пара по причине низких температур в топке. На самом деле за счет ряда технических решений (например, зольные теплообменники) повышенные параметры пара успешно применяются в котлах с ЦКС. Первый котел с температурой перегрева более 565°C был пущен в 1996 г во Франции. Блок мощностью 460 МВт в Польше обеспечивает лучший в мире КПД для блоков с котлами с ЦКС – 43,3 %, что в совокупности с очень низким уровнем выбросов удовлетворяет требованиям директивы Евросоюза по крупным установкам сжигания топлив [2]. Помимо низкосортных местных углей на нем предполагается сжигать биомассу и шламы. Помимо роста параметров пара, увеличение эффективности блоков с котлами ЦКС достигается путем глубокой утилизации тепла уходящих газов, как это сделано на ТЭС в Логиже (рис. 2).

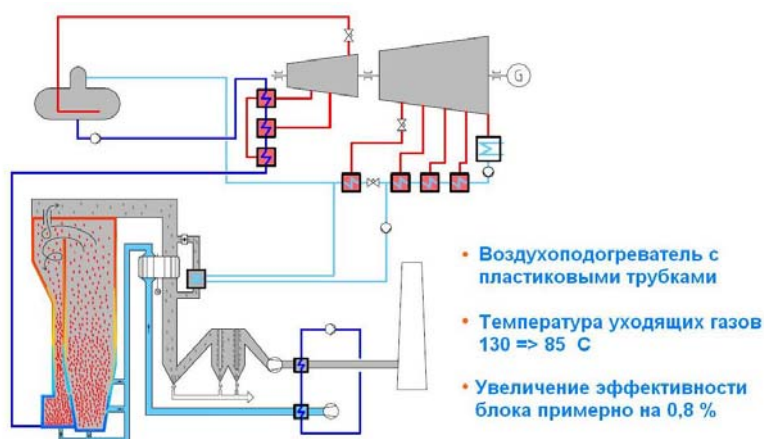


Рис. 2. Принципиальная тепловая схема блока ТЭС в Логиже с системой глубокой утилизации тепла уходящих газов

В работах ОАО «ВТИ» и в результате анализа ряда зарубежных публикаций было показано, что сочетание суперкритических параметров пара и технологии ЦКС является благоприятным (давление 30 МПа, температура 585/585-600/600 °С) по причине относительно низких и равномерных тепловых потоков в топке котла. По условиям длительной прочностной безопасной эксплуатации возможна при использовании плавниковых труб диаметром 32 мм с толщиной стенки 6 мм из стали 12Х1МФ.

В [3] приведены результаты разработок компании «Фостер-Уиллер» по созданию блоков 600 – 800 МВт с котлами ЦКС с температурой перегрева пара до 700°C . Наиболее предпочтительным представляется вариант блока 800 МВт, как реальный для внедрения в ближайшее время. Параметры острого пара: рас-

ход – 569 кг/с, давление – 31,5 МПа, температура – 604 °С. Параметры пара промежуточного перегрева 487 кг/с, 4,41 МПа, 621 °С. Продольный разрез котла показан на рис. 3.

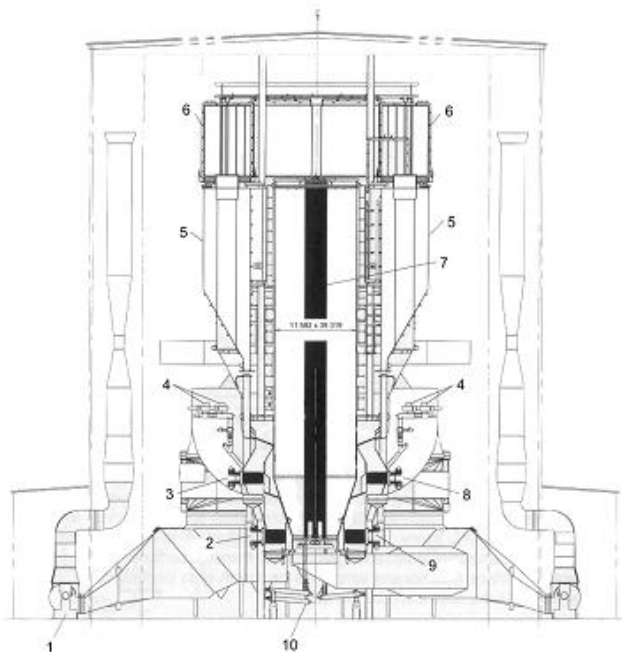


Рис. 3. Продольный разрез котла ЦКС энергоблока мощностью 800 МВт_{эл.}

1- вентилятор вторичного воздуха; 2- INTREX-3 (острый пар); 3- INTREX-4а (острый пар); 4- питатель топлива; 5- компактный сепаратор; 6- выход из сепаратора; 7- двухсветный экран; 8- INTREX-4; 9- INTREX-4б (острый пар); 9- INTREX-3 (промежуточный пар); 10- шнеки-охладители выгружаемой золы

При всех достоинствах применения теплообменников INTREX™ их недостатком является то, что при большом их количестве в крупных котлах ЦКС (до 16 и более) они занимают значительную часть периметра нижней части топki, необходимую для размещения пусковых горелок, организации подвода топлива и сорбента, отвода золы. Поэтому в последних конструкциях котлов ЦКС использована каскадная схема включения теплообменников INTREX™ (в два яруса), при которой циркулирующие в контуре ЦКС частицы из верхних теплообменников сбрасываются в нижние, где к ним дополнительно добавляются горячие частицы, отбираемые из топki, после чего производится окончательный вынос их в кипящий слой.

Другой проблемой является регулирование температуры промперегрева при пониженных нагрузках. Для свежего пара в прямоточных котлах она легко решается изменением соотношения вода – топливо. В случае промперегрева приходится использовать разделенные параллельные газоходы в конвективной шахте с шибберным регулированием расхода газов, паровой байпас холодной ступени промпароперегревателя, впрыскивающие пароохладители в рассечку ступеней и теплообменники INTREX™.

Конструкции котлов с ЦКС претерпели заметные изменения. Они направлены на снижение металлоемкости, уменьшение количества футеровки и повышение надежности. В этом плане значительный прогресс достигнут компанией

Фостер-Уиллер при использовании схемы с компактными сепараторами и встроенными зольными теплообменниками INTREX™. Компания «Бабкок-Вилькоккс» (США) существенно изменила конструкцию котла с швеллерковыми сепараторами, обеспечив подвеску швеллерков на трубный пучок. Тем самым во многом снята проблема роста мощности таких котлов.

Значительные работы, направленные на снижение капитальных и эксплуатационных затрат, проводятся в Китае [4, 5]. Основные проблемные зоны котлов с ЦКС показаны на рис. 4.

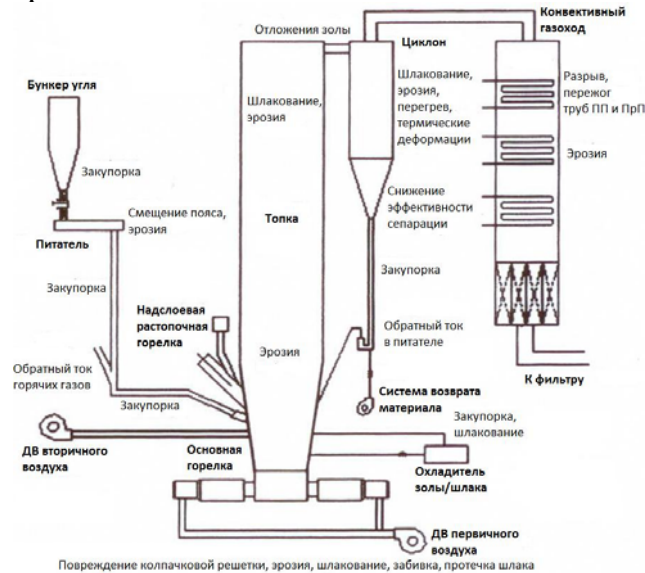


Рис. 4. Основные проблемы, связанные с эксплуатацией котла с ЦКС [4].

Ряд проблем являются типичными для всех котлов с ЦКС, некоторые в большей мере характерны для котлов китайского производства.

Важные работы выполнены по снижению затрат электроэнергии на собственные нужды [5]. 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 [5] это дает экономию около 7 млрд. тонн угля и снижение выбросов CO₂ 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. Донгфенгский котельный завод предложил концептуальную конструкцию, сочетающую в себе простоту эксплуатации, надежность и относительно невысокую стоимость изготовления. Первой особенностью является однокамерная топка с единой воздухораспределительной решеткой, что позволило отказаться от запаса напора (около 5 кПа), необходимого для предотвращения опрокидывания массы слоя, характерного для конструкции топки типа «штаны» (с разделенной воздухораспределительной решеткой) [6]. Второй особенностью стал отказ от теплообменников кипящего слоя (КС), перегреватели острого и вторичного пара, были расположены в топке и конвективном газоходе, таким образом, данная мера позволила отказаться от использования дутьевого вентилятора высокого давления. Вместо РВП был использован ТВП, что привело к снижению присосов и потребляемой мощности

дутьевого вентилятора. По сравнению с котлом со схожими характеристиками затраты на собственные нужды снизились с 6,8 до 4,5 %. Для пылеугольных котлов той же мощности, снабженных установками сероочистки, потребности в энергии на вспомогательные нужды составляют более 6 %. Результаты, показанные на станции в Фуджияне, доказывают, что крупные блоки ЦКС могут уверенно конкурировать в показателях потребления энергии на собственные нужды с пылеугольными агрегатами.

На рабочей встрече участников соглашения по использованию технологии кипящего слоя при международном энергетическом агентстве был представлен доклад [7] о положении дел в Китае в связи с введением новых норм на вредные выбросы, которые были введены в сентябре 2011 г. Они являются самыми жесткими в мире. На рис. 5 дано сравнение новых норм на выбросы в Китае с действующими нормами в США, Европе и Японии.

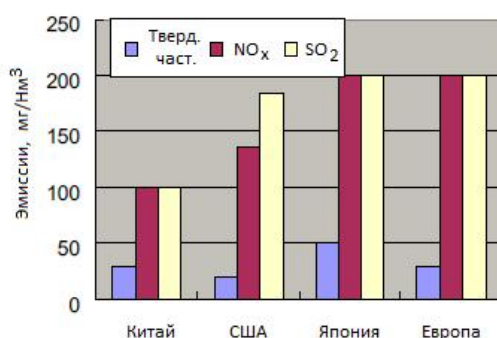


Рис. 5. Сравнение норм на выбросы.

В связи с введением новых норм в [7] рассмотрены возможности использования технологии ЦКС. Считается, что наиболее перспективно применять ее для сжигания топлив с низким выходом летучих. На рис. 6 показано, что с ростом выхода летучих выбросы оксидов азота в котлах с ЦКС растут, тогда как для пылеугольных котлов они снижаются. Кроме того, для котлов с ЦКС очень эффективно применение простого способа некаталитического восстановления (рис. 7). В [7] считается, что для топлив с содержанием серы 1 – 2 % применение котлов с ЦКС наиболее предпочтительно. При этом может быть использована NID технология для еще большего улавливания серы.

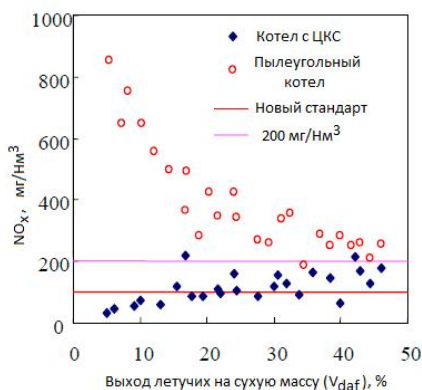


Рис. 6. Влияние выхода летучих на выбросы оксидов азота по данным [7]



Рис. 7. Оптимальное место ввода аммиака для подавления оксидов азота

Опыт использования котлов с ЦКС для сжигания сланцев в Эстонии показал ряд преимуществ этой технологии по сравнению с пылевым сжиганием [8]. 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.

2 Разработки энергетических котлов с ЦКС в России

Использование кратко изложенного выше мирового опыта обеспечит минимальные технические риски при внедрении технологии ЦКС на блоках 225 - 330 МВт в России и изготовлении большинства элементов котлов на отечественных заводах. 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.

По технико-экономическим соображениям наиболее перспективными для сжигания в котлах с ЦКС топливами являются АШ, угли печорского бассейна, тощие кузнецкие угли, подмосковные бурые угли, бурые угли Урала и Дальнего востока, а также отходы углеобогащения, торф, сланцы и биомасса [9]. Хорошим сочетанием топлив являются кузнецкие каменные угли и угли печорского бассейна, а также экибастузские угли. Бурые угли лучше сочетаются с сжиганием биомассы и торфа. Для малореакционных топлив (АШ и тощие угли) вполне допустимо совместное сжигание с отходами углеобогащения.

Как показано в [9], важным условием оптимального использования технологии ЦКС является достижение не только действующих сейчас в РФ, но и перспективных норм на вредные выбросы без использования установок серо и азотоочистки. Другим существенным преимуществом является диверсификация поставок топлива.

В ОАО «ВТИ» с 1989 г. 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), КазНИИЭнергетики (г. Алма-Ата), Уральский политехнический институт (г. Екатеринбург), Институт теплофизики СО РАН (г. Новосибирск), Московский энергетический институт и другие организации. 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 сильнозапыленным потоком.

На основе исследований гидродинамики и теплообмена в моделях котлов с ЦКС с учетом обобщения ряда зарубежных данных предложен базовый подход к расчету топок котлов с ЦКС [10]. Разработаны рекомендации по определению основных размеров и показателей уловителей золы и системы возврата котлов с

ЦКС. Расчеты, выполненные в соответствии с указанными методиками, показали возможность определения основных характеристик проектируемых котлов и удовлетворительную сходимость данных поверочного расчета.

В 2010 – 2012 г.г. при финансировании Минпромторга РФ выполнен комплекс работ по разработке эскизных проектов отечественных котлов с ЦКС для блоков 225 и 330 МВт. Они включали в себя разработку оригинальных систем улавливания и возврата золы с зольными теплообменниками плотного слоя, разработку эскизных проектов отдельных систем котла, выбор основных компоновочных решений и расчет тепловых схем блоков. Кроме того, выполнено 3D математическое моделирование элементов топочного контура и проведены исследования на аэродинамических установках. Некоторые проблемы, создания отечественных котлов с ЦКС рассмотрены в [11].

3 Применение технологии ЦКС для снижения выбросов парниковых газов

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 (рис. 8) 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 последнее время за рубежом проводятся значительные исследования на крупных пилотных установках [12], для новых установок [13] и разрабатываются варианты применения для новых установок [13], а также гибких систем с возможностью сжигания как в традиционных условиях, так и в среде, обогащенной кислородом [14].

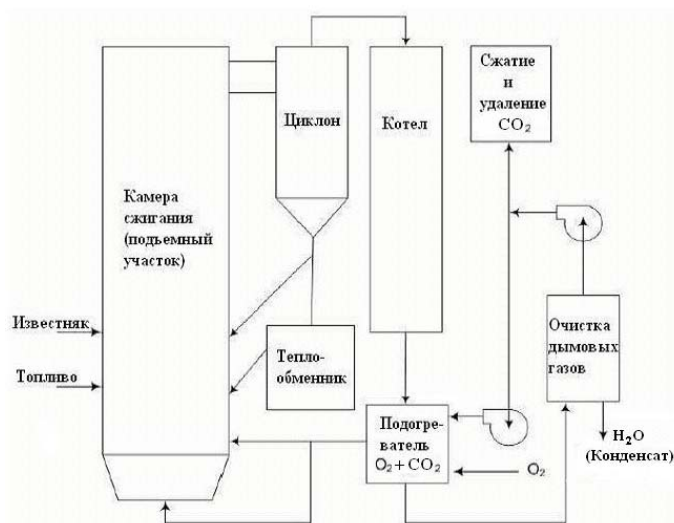


Рис. 8. Схема котла с ЦКС при сжигании в среде кислорода с рециркуляцией CO_2

В работе [15] была проведена оценка возможности и целесообразности 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 $O_2=15\div 32$ % об., а в качестве оптимальных режимов работы рассмотрена верхняя его часть $O_2=24\div 32$ % об. В настоящее время в ВТИ сооружается лабораторная установка кислородного сжигания тепловой мощностью около 10 кВт. В ОАО «ВТИ» были также проведены предварительные расчеты установки тепловой мощностью 56 МВт для сжигания Кузнецкого угля марки ДШ в среде с концентрацией кислорода 40 % и с использованием рециркуляции дымовых газов.

Получение концентрированного потока углекислого газа может быть достигнуто 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. 9).

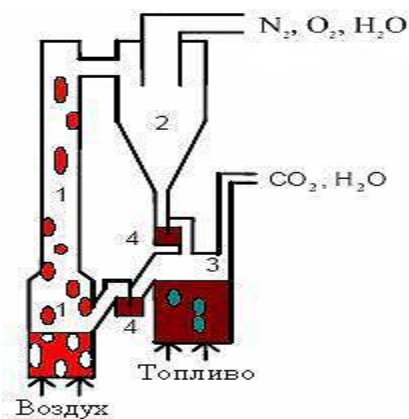


Рис. 9. Схема процесса сжигания газообразного топлива в химическом цикле.
1 – окислительный (воздушный) реактор, 2 – циклон, 3 – восстановительный (топливный) реактор, пневмозатворы.

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. В настоящее время по данным [16] насчитывается уже более 600 работ по различным аспектам использования химических циклов. В ходе экспериментов установлено, что возможна почти полная конверсия топлива при 100 % улавливании CO_2 . Многие работы направлены на исследование сжигания газа. Пока еще только на нескольких установках использовали твердые топлива [17]. При этом в качестве оксидов металлов – носителей кислорода применялся природный минерал (ильменит). Мировой эксплуатационный опыт сжигания топлив в химическом цикле, включающих носители кислорода с основой на Ni, Fe, Mn, Cu и Co оксидах, насчитывает более 4000 часов.

Новые подходы [18] применительно к сжиганию твердых топлив связаны с так называемой технологией сжигания в химических циклах с расщеплением кислорода – CLOU, в которых в качестве носителей кислорода используются оксиды меди.

Значительными представляются преимущества технологии сжигания топлив в химических циклах с позиции изменения КПД выработки электроэнергии. В соответствии с данными, приведенными в [19], 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.

Активные исследования ведутся в области газификации с использованием химических циклов [20] (рис. 10), а также применения химических циклов с реакторами кальцинации и карбонизации для получения чистых потоков CO_2 [21].

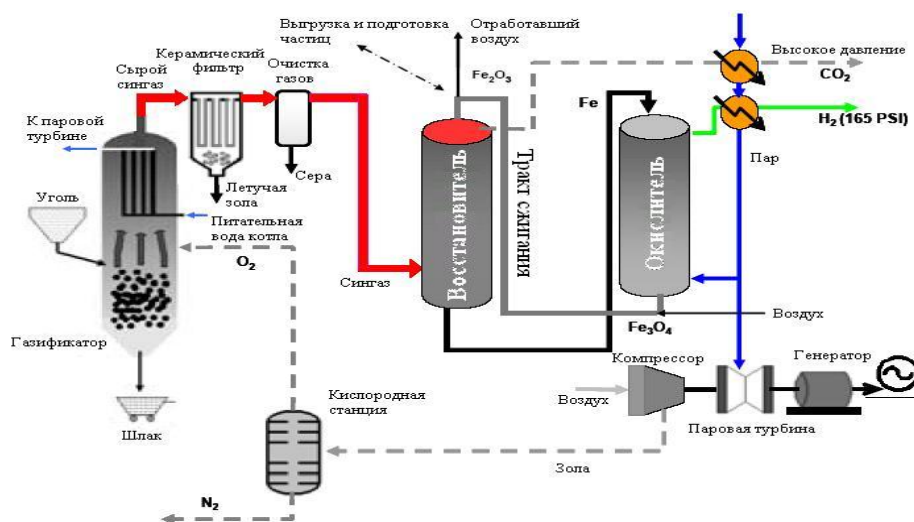


Рис. 10. Схема получения водорода при газификации угля с использованием химических циклов.

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. ОАО «ВТИ» совместно с НИФ-ХИ им. Л. Я. Карпова, РГУ нефти и газа и ОАО «Подземгазпром» выполнил ряд работ по исследованиям сжигания в химических циклах и захоронения CO_2 , финансируемых по контрактам с Минобрнаукой РФ [22].

Список литературы

- 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, Łagiszka 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 OUC and CFB boiler technologies, Proc. of 19-th Int. Conf. on FBC, May, 21-23, 2006, Vienna, Austria.
- 4 L. Cheng, J. Zhang, Z. Luo and K. Cen, Problems with circulating fluidized bed (CFB) boilers in China and their solutions, *VGB PowerTech*, 10, 2011, pp. 60-69.
- 5 H. Yang, G. Yue, H. Zhang and J. Lu, Update design and operating experience of CFB boilers with energy saving process in China, *VGB PowerTech* 7/2011, pp 49-53.
- 6 Li. J., Mi. J., Hao. J. et al.: Operational Status of 300MWE CFB Boiler in China, In: G.Yue (eds.), 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Xi'an, 2009, China.
- 7 H. Yang, H. Zhang, G. Yue, The Influence of the New Emission Standard on the CFB Boiler in China and the Solutions, 64-th IEA FBC Meeting, June, 3, 2012, Naples, Italy.
- 8 Loosaar, H. Arro, D. Neshumayev, K. Plamus, A. Ots, T. Parve, T. Pihu, A. Prikk, P. Rushe-lyuk, Firing Estonian oil shale fuel in CFB boilers, Proc of Int. Conf. CFB9, 13-16 May 2008, Hamburg, Germany, pp 601-606.
- 9 Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев, Д. С. Литун, Д. А. Санкин, И. Г. Дмитриюкова, Перспективы использования технологии ЦКС при техническом перевооружении ТЭС России, *Теплоэнергетика*, № 1, 2009 г.
- 10 Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев, Работы ОАО «ВТИ» по научному обоснованию расчета топочного контура котлов с циркулирующим кипящим слоем, *Теплоэнергетика*, № 6, 2011 г.
- 11 Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, Д.А. Мельников, Д.А. Санкин, И.Г. Дмитриюкова – инженеры, Б.Н. Фирсов, Г.И. Жуков, В.В. Иваненко, В.В. Балакин, А.В. Кузнецов, Разработка типовых котлов с ЦКС для технического перевооружения ТЭС, *Электрические станции*, № 6, 2011 г., стр. 18 – 26.
- 12 M. Varonen, I. Huuhtainen, M. Palonen, V. Ylä-Outinen, Results of Oxyfuel Combustion Tests in 4 MWth CFB Pilot Boiler, Proc. of Int. Conf. FBC 21 June 4-6, 2012, Naples, Italy, pp. 325-332.
- 13 ALSTOM Power: “Greenhouse Gas Emissions Control by Oxygen Firing in Circulating Fluidized Bed Boilers. Phase I A Preliminary Systems Evaluation”, Final Report Volume 1, 2003.
- 14 Arto Hotta, Kalle Nuortimo, Timo Eriksson, Juha Palonen, Sami Kokki, CFB technology provides solutions to combat climate change, Foster Wheeler Energia Oy, Finland, Plenary lecture at CFB-9 conference, 2008, pp 11-17
- 15 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.
- 16 A. Lyngfelt, M. Johansson, T. Mattisson, Chemical looping combustion – Status of development, Proc. of CFB 9, May 13-16, Hamburg, Germany, pp 39-53
- 17 P. Markström, A. Lyngfelt, C. Linderholm Chemical Looping Combustion in a 100 KW Unit for Solid Fuels, Proc. of Int. Conf. FBC 21 June 4-6, 2012, Naples, Italy, pp. 285-292.
- 18 Juan Adánez, Chemical-Looping Combustion of Coal: Recent Developments and Technology Challenges, plenary lecture, Proc. of Int. Conf. FBC 21 June 4-6, 2012, Naples, Italy, pp. 12-27.
- 19 Материалы международного семинара по программам ENCAP и CASTOR, г. Биллунд, Дания, 15 – 16 марта 2006г. ENCAP-CASTOR Training Seminare/Workshop, March 16, 2006, Bilund, Denmark.
- 20 L.-S. Fan, Fanxing Li, Luis G. Valazquer-Vargas, Shwetha Ramkumar, Chemical looping gasification, Proc. of CFB 9, May 13-16, Hamburg, Germany, pp 801-806.
- 21 Sven Unterberge, Avaluation of Carbonate Looping for Post-Combustion CO₂ Capture from a Utility's Perspective, 3rd IEAGHG Network Meeting and Technical Workshop on High Temperature Solids Looping Cycles, Vienna University of Technology, 30th-31st of August, 2011.
- 22 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.