

## Топливо и энергетика

УДК 662.66:66096.5

### Реализация технологии сжигания высокозольного антрацита и отходов его обогащения в циркулирующем кипящем слое на энергоблоке № 4 (210 МВт) Старобешевской ТЭС

**Белый Г.В.<sup>1</sup>, Иванов В.И.<sup>2</sup>, Корчевой Ю.П.<sup>3</sup>, Майстренко А.Ю.<sup>3</sup>, Смирнов И.Х.<sup>4</sup>, Топал А.И.<sup>3</sup>, Шевченко В.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ПАО «Центрэнерго», Киев

<sup>2</sup> ПАО «Донбассэнерго» Старобешевская ТЭС, Донецк

<sup>3</sup> Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев

<sup>4</sup> ПАО «Донбассэнерго», Донецк

Рассмотрен опыт внедрения первого в Украине и странах СНГ энергоблока значительной электрической мощности (210 МВт) с котлоагрегатом с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) паропроизводительностью 670 т/ч, предназначенным для сжигания высокозольного (до 55 %) шлама антрацита, антрацита и отходов углеобогащения, а также их смесей. Описана технологическая схема ЦКС-процесса, рассмотрены особенности пароводяного тракта котлоагрегата и системы топливоподготовки. Приведен анализ основных мероприятий, выполненных в ходе пуско-наладочных работ, по модернизации и совершенствованию ЦКС-технологии.

**Ключевые слова:** уголь, отходы, зола, шлам, циркулирующий кипящий слой.

Розглянуто досвід впровадження першого в Україні та країнах СНД енергоблоку значної електричної потужності (210 МВт) з котлоагрегатом з циркулюючим киплячим шаром (ЦКШ) паропродуктивністю 670 т/год, призначеним для спалювання високозольного (до 55 %) шламу антрациту, антрациту та відходів вуглезбагачення, а також їх сумішей. Описано технологічну схему ЦКШ-процесу, розглянуто особливості пароводяного тракту котлоагрегата та системи паливопідготовки. Наведено аналіз основних заходів, здійснених під час пуско-налагоджувальних робіт, щодо модернізації та вдосконалення ЦКШ-технології.

**Ключові слова:** вугілля, відходи, зола, шлам, циркулюючий киплячий шар.

Технология сжигания угля в циркулирующем кипящем слое (ЦКС) на протяжении последних двух десятилетий получила стремительное развитие, сопровождающееся промышленным внедрением крупных (200–300 МВт) энергобло-

ков в развитых странах мира (США, Китай, Германия, Финляндия, Польша и др.) [1–3].

ЦКС-технологии относят к «чистым угольным энерготехнологиям», поскольку ее внедрение в энергетику обеспечивает высокие техниче-

ские и экологические показатели работы угольных энергоблоков: низкие уровни выбросов оксидов серы и оксидов азота — до 200 мг/нм<sup>3</sup>; пыли — менее 50 мг/нм<sup>3</sup>. Последнее соответствует современным экологическим нормативам на выбросы загрязняющих веществ, принятым в Европейском Союзе, и требованиям к строительству нового энергетического оборудования в Украине.

В настоящее время в мире находится в эксплуатации более 600 энергоблоков с ЦКС-котлоагрегатами электрической мощностью более 150 МВт, наибольшую мощность 460 МВт имеет энергоблок на ТЭС «Лагижа», Польша [2].

Процесс развития ЦКС-технологии постоянно поддерживается признанными мировыми котлостроительными фирмами (Foster Wheeler, Babcock & Wilcox, США; Alstom, Франция; Kvaerner, Финляндия и др.), некоторые из них уже разработали концептуальные проекты энергоблоков электрической мощностью 500–600 МВт [3].

Отличительная особенность работы ЦКС-котлоагрегатов — возможность эффективного сжигания угля различной степени метаморфизма: от бурого до антрацита, в том числе с высоким содержанием золы ( $A^d < 50\text{--}55\%$ ) и серы. При этом регулирование мощности энергоблока происходит в широком диапазоне (40–100 % номинальной) без использования природного газа для подсветки, что в настоящее время недостижимо для любого из пылеугольных котлоагрегатов, установленных на ТЭС Минэнерго Украины [4].

В Украине, первой среди стран СНГ, началось промышленное внедрение ЦКС-технологии в топливно-энергетический комплекс в рамках проекта реконструкции энергоблока № 4 (200 МВт) Старобешевской ТЭС. Перспективы и необходимость освоения ЦКС-технологии задекларированы в планах развития многих промышленно развитых стран мира, в частности, в «Энергетической стратегии России на период до 2030 года». Опыт внедрения и эксплуатации ЦКС-энергоблока освещен в настоящей статье.

#### **Особенности реализации проекта реконструкции блока № 4 Старобешевской ТЭС**

Реализация проекта строительства первого в Украине и странах СНГ энергоблока с ЦКС-котлоагрегатом на Старобешевской ТЭС была начата с подписания 11 декабря 1996 г. Кредитного соглашения с Европейским банком реконструкции и развития (ЕБРР), взятого под гарантии Украины. Подготовительные работы на

Старобешевской ТЭС проведены в соответствии с «Техническим решением о модернизации энергоблока № 4 Старобешевской ТЭС» от 15.04.97. Фирма, по лицензии которой внедрялась ЦКС-технология, была избрана на основании открытого международного тендера, прошедшего в два этапа (технический и коммерческий) в 2000 г.

В течение 2000–2001 гг. подрядчиками были выполнены проектные и подготовительные строительные работы. Проект реконструкции прошел государственную экспертизу и получил положительное заключение 8 ноября 2001 г.

В ходе реконструкции устаревший пылеугольный котлоагрегат ТП-100, нарабатывавший на момент вывода из эксплуатации 232407 ч, был демонтирован и заменен ЦКС-котлоагрегатом (АЦКС-670) проектной паропроизводительностью 670 т/ч. На турбине К-200-130 была осуществлена замена цилиндров высокого давления (ЦВД), передней части цилиндров среднего давления (ЦСД), роторов высокого давления (ВД) и среднего давления (СД), пароперепускных труб и автоматических затворов ВД и СД, что способствовало продлению срока эксплуатации турбины на 20–25 лет и давало возможность увеличить установленную мощность турбогенератора от 200 до 215 МВт.

В рамках тендера работы по проекту были распределены на три лота и выполнены в следующих объемах: по лоту № 1 «Котел» — заменен старый пылеугольный котлоагрегат (ТП-100 паропроизводительностью 640 т/ч) на атмосферный ЦКС-котел (проектной паропроизводительностью 670 т/ч); по лоту № 2 «Сушилка» — построена сушилка шлама проектной производительностью 220 т/ч по сухому продукту, в том числе системы подготовки и транспортирования сырого шлама и готового продукта; построен новый вагонопрокидыватель для выгрузки сырого шлама с подъездными путями и системой транспортировки; по лоту № 3 «Пылеуловитель» — установлен электростатический фильтр для глубокой очистки уходящих газов ЦКС-котлоагрегата.

Работы осуществлены под руководством победителей тендера: лоты № 1 и № 2 — фирмы Lurgi Lentjes AG (теперь LL Plant Engineering, Германия); лот № 3 — фирмы Alstom Power Environmental Systems AB (Швеция). Все контракты по лотам были подписаны в 2000 г. и осуществлены на условиях «под ключ».

Источниками финансирования проекта были кредит ЕБРР и собственные средства ПАО «Донбассэнерго». Общая стоимость проекта

реконструкции составила 117,5 млн евро, в том числе кредит ЕБРР — 84,5 млн евро, собственные средства «Донбассэнерго» — 33 млн евро. Удельные капитальные затраты оцениваются в 583 евро на установленный 1 кВт.

Ответственной организацией за строительно-монтажные и пуско-наладочные работы была фирма «СЕС Тлмаче», Словакия (субподрядчик Lurgi Lentjes AG). Основные работы по строительству и монтажу оборудования по контракту были завершены в сентябре 2004 г. Первый пуск энергоблока с включением турбогенератора в электрическую сеть и достижением электрической нагрузки 15 МВт был проведен 29–31 октября 2004 г. До 29 июля 2005 г. на котле проводились пуско-наладочные работы с использованием различных видов топлива. В процессе наладки была достигнута работа энергоблока на мощностях 170–180 МВт.

29 июля 2005 г. на ЦКС-котлоагрегате энергоблока № 4 Старобешевской ТЭС возникло технологическое нарушение, которое привело к разрушению конвективного газохода, его дальнейшему демонтажу и соответствующей остановке пуско-наладочных работ. В течение 2005–2007 гг. конвективный газоход и системы энергоблока, которые получили повреждения, были восстановлены за счет средств генподрядчика.

В начале 2008 г. возобновились первые «горячие» пуски энергоблока, в апреле-мае — гидравлические испытания. Пуско-наладочные работы, цель которых состояла в окончательной отладке стабильных режимов сжигания высокотемпературного антрацита (отходов углеобогащения в смеси с ним), проводились до декабря 2010 г.

27–30 января 2011 г. было проведено комплексное испытание оборудования, в ходе которого энергоблок непрерывно отработал 72 ч на следующих параметрах: мощность — 210 МВт с диапазоном регулирования 190–217 МВт; параметры пара — номинальные; топливо — шлам антрацита с низшей теплотой сгорания  $Q_{i,r} = 4300\text{--}4800$  ккал/кг; подсветка газом не использовалась.

В феврале-марте 2011 г. были проведены гарантийные испытания оборудования, во время которых были подтверждены контрактные обязательства подрядчиков относительно технико-экономических показателей работы котлоагрегата.

В ходе освоения ЦКС-технологии были учтены ранее проведенные в Украине и Германии исследования по сжиганию высокотемпературного антрацита и шлама антрацита, а также результаты экспериментальных работ, выполненных на пилотных стендах [5, 6]. Во время проведения

пуско-наладочных работ был накоплен уникальный практический опыт работы и адаптации ЦКС-технологии к отечественным условиям эксплуатации и особенностям местного угля, разработаны новые технические решения, внедрение и отработка которых позволили усовершенствовать методы и надежность работы систем ЦКС-котлоагрегата, а также улучшить технико-экономические показатели работы всего энергоблока.

### Организация технологической схемы работы ЦКС-котлоагрегата

В соответствии с проектом, в качестве основного топлива для ЦКС-котлоагрегата были избраны высокотемпературные (до 55 %) шламы антрацита, накопленные в достаточном количестве и ранее не использовавшиеся в теплоэнергетике, а в качестве резервного топлива — антрацитовый штыб и его смеси со шламом.

Технологическая схема энергоблока № 4 Старобешевской ТЭС представлена на рис.1.

Организация работы энергоблока предусматривалась следующим образом. Исходный шлам влажностью 18–22 % сушится в барабанной сушилке до влажности 8–10 %, после чего подается в приемные бункеры энергоблока. При использовании антрацита осуществляется его измельчение в молотковых дробилках до размера частиц менее 3 мм.

Топливо (шлам, антрацит или их смесь) подается в топку с помощью четырех транспортеров в четыре точки подачи — на склоны тепловых затворов, откуда под действием силы тяжести (самотеком) попадает на под топки, где установлена газораспределительная колпачковая решетка кипящего слоя.

Топочная камера ЦКС-котла прямоугольной формы состоит из газоплотных сварных панелей, образующих часть испарительного контура. Нижняя часть топки разделена на две секции (pant-leg design, или «штаны»). Под топки образуют две решетки, оснащенные колпачками. Характерные размеры топочной камеры: высота — около 40 м, глубина — около 13 м, ширина — около 11 м. Нижняя часть топки футерована до уровня около 9 м.

Сжигание топлива в ЦКС происходит при 880–920 °С, что ограничивает образование термических оксидов азота. Дополнительно в топку подается известняк для связывания оксидов серы. Изначально материал слоя состоит из инертных частиц стартового материала топки (обычно выжженная зола), который в процессе работы должен быть замещен золой сжигаемого топлива и частицами известняка.

Содержимое горючих веществ в циркулирующей массе слоя, как правило, составляет 2–4 % общей массы слоя, что качественным образом отличает ЦКС-технологию сжигания от обычного пылеугольного.

Новый ЦКС-котлоагрегат содержит барабан и использует систему естественной циркуляции пароводяной смеси. В основном пар генерируется в испарительных поверхностях котла, образующих топочную камеру. Дополнительные испарительные поверхности, поверхности перегрева и промежуточного перегрева пара размещены в выносных теплообменниках кипящего слоя (ТОКСах), находящихся снаружи боковых стенок котла. Поверхности перегрева и промпрегрева пара размещены также в конвективном газоходе котла. Наличие в топочной камере ширмовых поверхностей не предусмотрено.

Отличительная особенность сжигания в ЦКС — многократная циркуляция материала слоя благодаря системе возврата коксозольного остатка (КЗО). Конструктивно эта система работает по ЦКС-технологии Lurgi и на блоке № 4 Старобешевской ТЭС содержит внешние циклоны (4 шт.), опускные подциклонные

стояки (4 шт.), тепловые (пневмо-) затворы (4 шт.), пиковые клапаны (8 шт.) для перераспределения коксозольного потока между ТОКСами. Основное предназначение циклонов — сепарация с заданной эффективностью коксозольных частиц, возвращаемых для дожигания в ЦКС-топку, от продуктов сгорания, поступающих на вход конвективного газохода. Опускной стояк и тепловой затвор предназначены для возврата уловленных в циклоне частиц в топку и обеспечения квазигазоплотного соединения (сифона) между выходом (нижней частью) циклона и топочной камерой.

Для обеспечения экологических нормативов по очистке дымовых газов от частиц пыли на выходе конвективного газохода используется электростатический фильтр фирмы Alstom Power (Швеция), эффективность улавливания летучей золы которым превышает 99,9 % и обеспечивает концентрацию пыли в уходящих газах менее 50 мг/нм<sup>3</sup>.

Управление котлоагрегатом основано на системе АСУ ТП Телеперм компании Сименс, Германия.

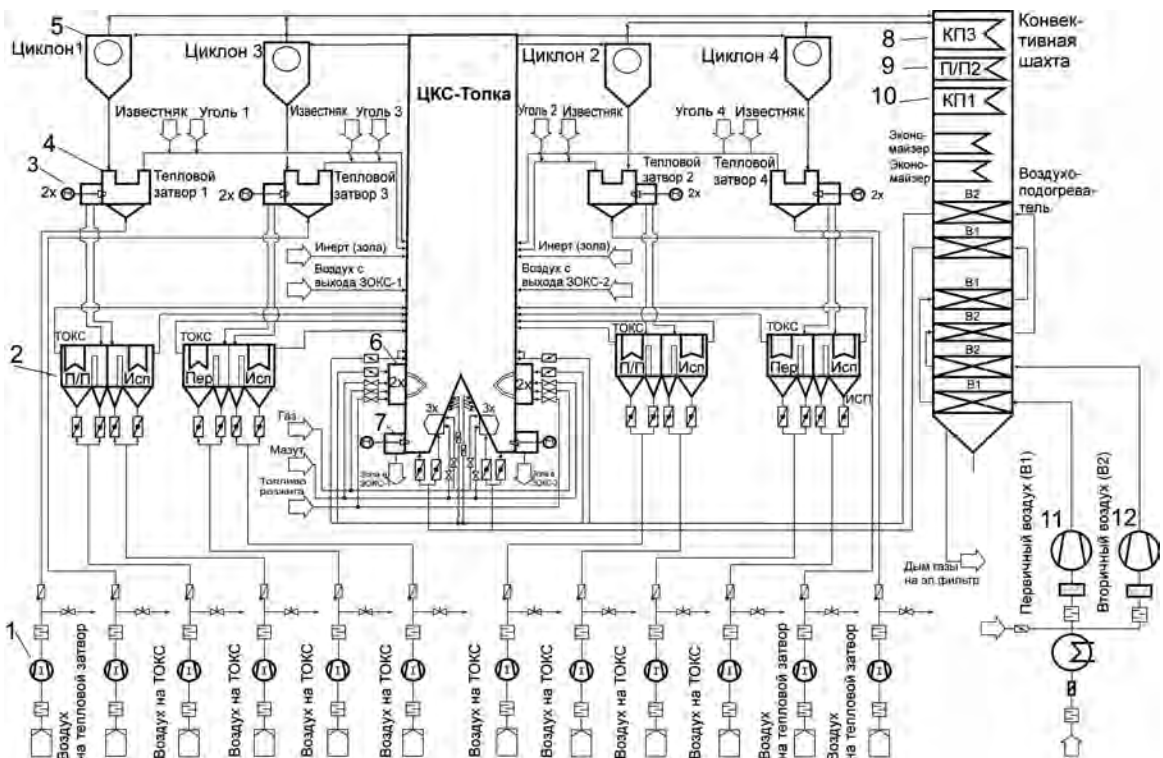


Рис.1. Технологическая схема процесса сжигания угля и шлама в АЦКС-котлоагрегате (215 МВт) энергоблока № 4 Старобешевской ТЭС: 1 — высоконапорная воздухоудвка; 2 — ТОКС; 3 — пиковый клапан; 4 — тепловой затвор; 5 — сепаратор; 6 — пусковые горелки; 7 — система вывода донной золы в золоохладители кипящего слоя (ЗОКСы); 8–10 — теплообменные поверхности; 11 — вентилятор первичного дутья; 12 — вентилятор вторичного дутья. Поверхности: П/П — промпрегрева пара; Исп. — испарительные; Пер. — пароперегревающие; КП — конвективного пароперегревателя.

### Особенности пароводяного тракта ЦКС-котлоагрегата

Основные гарантийные (расчетные) показатели работы ЦКС-котлоагрегата блока № 4 Старобешевской ТЭС приведены ниже:

Паропроизводительность, т/ч	–	670
Острый пар на входе в ЦВД:		
давление, МПа	–	12,75
температура, °С	–	540
Промперегрев на входе в ЦСД:		
температура, °С	–	540
Питательная вода на входе в котел:		
давление, МПа	–	18,0
температура, °С	–	244
Диапазон регулирования нагрузки (L) котла, % от ном. (минимальная нагрузка, % от ном.)	–	50–100 (40)
КПД парогенератора, %:		
при L = 100 %	–	90,5
при L = 50 %	–	90,0
Расход топлива, т/ч:		
АШ	–	95,390
шлак сухой	–	159,233

Обеспечить указанные параметры призвана единая пароводяная система ЦКС-котлоагрегата, где используется принцип естественной циркуляции, в состав основных элементов которой входят барабан, испарительный контур, первичный пароперегреватель, вторичный (промежуточный) пароперегреватель, водяной экономайзер, пароохладители.

Первичный пароперегреватель состоит из трех основных ступеней. Низкотемпературная содержит следующие элементы: пароохлаждаемые подвесные трубы в конвективном газоходе; экраны конвективного газохода; пучок пароперегревателя, расположенный над экономайзером в конвективном газоходе; пучок пароперегревателя, расположенный в ТОКСах. Среднетемпературная ступень расположена в ТОКСах, а высокотемпературная в конвективном газоходе.

Вторичный пароперегреватель состоит из двух основных ступеней: низкотемпературной ступени, расположенной в ТОКСах; высокотемпературной ступени, расположенной в конвективном газоходе между пучками перегревателя острого пара.

Таким образом, двухсекционные ТОКСы содержат поверхности: испарительные — 4 секции (по одной в ТОКСах №№ 1–4); перегрева пара — 2 секции (ТОКС № 3, № 4); промперегрева — 2 секции (в ТОКСах № 1, № 2).

Тепловая схема энергоблока № 4 моноблочная (котел — турбина) без поперечных

связей с другими блоками по паропроводам высокого давления и питательной воды.

Отработанный пар из ЦВД по двум паропроводам холодного промперегрева направляется во входной коллектор вторичного пароперегревателя. С выхода вторичного пароперегревателя пар по двум паропроводам горячего промперегрева направляется в ЦСД турбины. Каждый из паропроводов горячего промперегрева перед автоматическими затворами среднего давления разветвляется на два. Выходной коллектор вторичного перегревателя оснащен предохранительными клапанами, пропускная способность которых рассчитана на максимальное количество пара промперегрева.

С учетом специфики процесса горения в ЦКС-котлоагрегате (инерционность тепловыделения) принята двухбайпасная пусковая схема с применением байпасов ВД и НД. Байпас ВД, пропускная способность которого составляет 100 % паропроизводительности котла (включая впрыски питательной воды), предназначен для байпасирования острого пара в обход ЦВД в паропроводы холодного промперегрева.

Байпас НД, пропускная способность которого составляет 40 % паропроизводительности котла, осуществляет сброс пара из горячих ниток промперегрева в конденсаторы в обход ЦСД. Пропускная способность байпаса НД с учетом впрыскивания выбрана из условия превышения максимально допустимого расхода пара на конденсаторы (400 т/ч). Кроме того, схемой предусмотрен аварийный сброс пара в атмосферу из выходного коллектора промперегрева, пропускная способность которого составляет 100 % паропроизводительности котла.

Во время реконструкции блока была предусмотрена замена питательного электронасоса ПЭ-640-180 на питательный турбонасос с номинальной подачей пара 693 т/ч. Отбор пара на турбину привода турбонасоса в количестве 40 т/ч осуществляется из паропровода острого пара, сброс отработанного пара производится в общестанционный коллектор резервного пара электростанции для использования на общестанционные нужды.

Для охлаждения поверхностей нагрева котла после его аварийной остановки при полной потере напряжения предусмотрен аварийный питательный насос с дизельным приводом. Схемой предусматривается возможность отбора пара из холодных нитей промперегрева для собственных нужд блока, а также общестанционных нужд через редуцирующее устройство в количестве 40 т/ч (при номинальном режиме и при отключенном питательном турбонасосе). Расход

пара на собственные нужды блока (паровой воздухоподогреватель, подогрев мазута, вспомогательное оборудование, сажеобдувка) составляет 26 т/ч, при работе питательного турбонасоса – 69 т/ч.

### Система топливоподготовки

Эффективность и надежность работы технологической схемы ЦКС-энергоблока № 4 Старобешевской ТЭС как единого комплекса во многом определяет согласованная и надежная работа системы подготовки топлива (в том числе оптимальный метод организации его сушки и измельчения), а также топочной камеры ЦКС-котлоагрегата (оптимальный воздушный баланс топочной камеры, стабильность работы системы возврата).

В соответствии с проектом реконструкции, в качестве основного топлива ЦКС-котлоагрегата выбран шлам антрацита из отстойников-накопителей обогатительных фабрик, расположенных в районе ТЭС; в качестве резервного – антрацит, а также предусматривалась возможность сжигания их смесей. Расчетные параметры указанных топлив приведены в таблице.

Гарантийный диапазон качества топлива включает смесь шлама и антрацита с содержанием шлама от 85 до 100 %. Гарантийная точка – смесь шлама и антрацита с содержанием шлама 85 %. Гранулометрический состав сжигаемого антрацита фактически определяется условиями измельчения в молотковых дробилках (4 шт. на котел), куда он направляется перед подачей в ЦКС-топку (по проекту, максимальный размер частиц не превышает 3 мм).

Существующая система подготовки топлива предназначена для сушки мокрых шламов влажностью до 22,5 %, которые поставляются из отстойников-накопителей обогатительных фабрик

### Элементный и технический анализ расчетного топлива

Показатель	Антрацит	Шлам
Компонент, % (на рабочую массу):		
Сг	59,616	37,881
Нг	1,1664	0,7452
Сг	1,7496	1,1592
Нг	0,5184	0,3312
Ог	1,7496	1,2834
Зольность Аг, % (на рабочую массу)	25,2	50,6
Влажность Wг	10,0	8,0
Всего, %	100,0	100,0
Для справки:		
летучие, %	4,0	5,0
Qг, кДж/кг	20700,0	12922,77



Рис.2. Генератор горячих газов.



Рис.3. Вращающаяся барабанная сушилка.

в качестве основного топлива для ЦКС-котлоагрегата. Проектная производительность сушилки по сухому (8 % влажности) продукту составляет 220 т/ч (по сырому шламу – 260 т/ч). В состав системы входят генератор горячих газов (ГГ) (рис.2), вращающаяся барабанная сушилка (длиной около 25 м) (рис.3), пылеуловитель – рукавный фильтр, вспомогательное оборудование (разгрузочное, размольное, транспортировочное, насосное и др.), в том числе электрооборудование, система контроля и КИПиА, дымовая труба (высота 40 м).

Сушильным агентом являются продукты сжигания топлива – горячие газы, образующиеся в ГГ. Связывание оксидов серы, образовавшихся во время горения, осуществляется подаваемым в топку известняком. Летучая зола из дымовых газов за топкой улавливается рукавным фильтром. Перед подачей в барабан сушильной установки шлам просеивается для удаления посторонних элементов.

Процесс сушки шлама начинается сразу же после его загрузки в барабан сушилки. В результате вращения барабана, имеющего на внут-

ренной поверхности специальные направляющие элементы, эта смесь передвигается к его выходному отверстию, где выгружается шнеком.

Выгрузка сухого продукта производится в систему его подачи в загрузочный бункер существующего конвейера подачи топлива к ЦКС-котлоагрегату. Излишек сухого продукта хранится на открытом складе в непосредственной близости от загрузочного бункера конвейера.

Подача топлива к реконструированным бункерам шлама, расположенным в котельном отделении блока № 4, происходит с использованием существующих галерей топливоподачи и конвейеров.

Для поддержания температуры сушильной смеси на входе в барабан сушилки 850–950 °С к горячим газам генератора подмешивается холодный воздух. Температура газов на выходе из барабана сушилки поддерживается системой автоматики в пределах 120–150 °С. С выхода барабана сушилки влажные дымовые газы вместе с летучей золой за счет тяги дымососа направляются к рукавному фильтру. Очищенные дымовые газы попадают в дымовую трубу.

Уловленная в фильтре зола накапливается в 8 бункерах, удаляется из них шнековыми транспортерами и направляется для смешивания с сухим продуктом из барабана.

Снижение выбросов  $SO_x$  предусмотрено подачей известняка в уголь на входе в мельницы (при работе генератора горячих газов на твердом топливе) или вдуванием измельченного в мельнице известняка в поток газов при работе на мазуте. Снижение уровня образования оксидов азота происходит благодаря оптимизации режима горения топлива (снижение температур, ступенчатой подачи воздуха для горения).

Подсушенный в сушилке шлам представляет собой порошок из слоистых частиц. Конечная влажность сухого продукта колеблется в диапазоне 8–10 %.

### **Мероприятия по адаптации ЦКС-технологии и модернизации оборудования**

Описанная выше общая компоновка основных систем энергоблока, в том числе котлоагрегата и системы подготовки топлива, была модернизирована, их эксплуатация усовершенствована на основании опыта пуско-наладочных работ.

Необходимость реализации новых технических решений и модификации оборудования были определены на основании теплотехнических испытаний, проведенных во время пуско-наладочных работ в 2008–2010 гг. К основным обнаруженным недостаткам работы отдель-

ных систем котлоагрегата были отнесены следующие: нестабильная работа циклонов (их зашлаковывание); перегревание и разрывы труб испарительных поверхностей, расположенных в выносных теплообменниках кипящего слоя (ТОКСах); ограничение производительности золоохлаждателей кипящего слоя (ЗОКСов) по выводу донной золы.

Для устранения указанных недостатков на протяжении 2008–2010 гг. была проведена плановая модернизация имеющегося оборудования котлоагрегата, которая обуславливала приостановку «горячих» пусков энергоблока.

**1. Модернизация тепловых затворов, подциклонных стояков и системы их управления.** По результатам пуско-наладочных работ в I–II кварталах 2009 г. и предыдущего опыта эксплуатации ЦКС-котлоагрегата блока № 4 Старобешевской ТЭС были приняты и в июле-сентябре 2009 г. реализованы технические решения по модернизации его систем и контрольного измерительного оборудования.

Проведение модернизации было связано с необходимостью совершенствования работы оборудования: тракта возврата КЗО в топочную камеру ЦКС-котлоагрегата (в том числе золоводов и тепловых затворов); выносных теплообменников кипящего слоя; системы топливоподготовки. Основные механические работы по модернизации элементов тракта возврата включали монтаж двухсекционных коробов воздуха и регулирующих клапанов (начало 2009 г.). Окончательно завершены работы были в конце сентября — начале октября 2009 г. в ходе интеграции и налаживания нового контрольно-измерительного оборудования в систему АСУ ТП «Телеперм». Первые «горячие» пуски энергоблока после модернизации, когда появилась возможность регистрации новых параметров технологического процесса (температур, давлений, расходов воздуха и т. п.) в АСУ ТП «Телеперм», состоялись в конце октября 2009 г. Это дало возможность проводить контроль и анализ режимных параметров работы ЦКС-энергоблока с целью дальнейшего повышения надежности его эксплуатации.

**2. Модернизация испарительных поверхностей выносных теплообменников кипящего слоя (ТОКСов).** По результатам пусков энергоблока, осуществленных в первой половине 2009 г., были обнаружены недостатки, связанные с надежностью работы испарительных поверхностей нагрева, расположенных в ТОКСах (четыре секции трубных пучков по одной в каждом ТОКСе). Недостатки проявлялись в разрывах труб и их перегреве, что при-

водило к внеплановой остановке котла и прекращению пуско-наладочных работ. В ходе модернизации испарительных поверхностей была изменена компоновка трубного пучка, а слабо-наклонные трубы заменены на трубы с уклоном  $10^\circ$ . Эти работы в основном были выполнены в июне-сентябре 2009 г.

**3. Модернизация золоохлаждителей кипящего слоя (ЗОКСов).** Система вывода донной золы содержит два золоохлаждителя кипящего слоя (ЗОКС № 1 и ЗОКС № 2). Эта система не подверглась изменениям в 2009 г. Критической работа ЗОКСов становилась при переходе на повышенные нагрузки энергоблока (более 160–180 МВт). Производительность ЗОКСов фактически определяет уровень концентрации материала в топочной камере, а следовательно, и перепады давления в ней и тракте возврата. Ограничение производительности ЗОКСов по выводу донной золы или их аварийное отключение приводило к необходимости внеплановой остановки котлоагрегата из-за превышения предельно допустимого уровня перепада давления в топочной камере.

Основные работы по модернизации ЗОКСов были проведены в июне-сентябре 2010 г. Окончательное завершение модернизации осуществлено в начале декабря 2010 г. с дальнейшим возобновлением «горячих» пусков ЦКС-котлоагрегата во второй декаде месяца.

Указанные мероприятия по модернизации оборудования и совершенствованию технологической схемы ЦКС-процесса позволили успешно пройти комплексное 72-часовое испытание (27–30 января 2011 г.) и гарантийные испытания (февраль-март 2011 г.), во время которых были достигнуты гарантийные показатели работы ЦКС-котлоагрегата.

### Выводы

На основании результатов пусков ЦКС-энергоблока № 4 Старобешевской ТЭС, осуществленных в 2011 г., а также с учетом позитивного опыта внедрения новых технических решений относительно реализации технологии сжигания высокозольного антрацита и шлама в ЦКС можно отметить следующее.

Осуществленные мероприятия и внедренные технические решения, направленные на адаптацию ЦКС-технологий сжигания высокозольного антрацита (на энергоблоке № 4 Старобешевской ТЭС) и в энергетике Украины, позволяют повысить надежность эксплуатации указанного оборудования, расширить диапазон регулирования мощности (40–100 %) энергоблоков на их основе без использования природ-

ного газа для стабилизации процесса горения, а также достичь минимальных выбросов оксидов серы и оксидов азота (менее 200 мг/нм<sup>3</sup>) и пыли (менее 50 мг/нм<sup>3</sup>).

Технические решения, заложенные в основу модернизации оборудования систем ЦКС-энергоблока № 4 Старобешевской ТЭС (в том числе золоводов, тепловых затворов, испарительных поверхностей теплообменников кипящего слоя (ТОКСов), золоохлаждителей кипящего слоя (ЗОКСов), системы АСУ ТП «Телеперм»), существенно повышают надежность его эксплуатации, управляемость процессом сжигания и циркуляции твердой фазы.

С учетом результатов пуско-наладочных работ, проведенных на энергоблоке № 4 Старобешевской ТЭС на протяжении 2009–2010 гг. во время теплотехнических испытаний, доказана возможность эффективного сжигания высокозольного антрацита на промышленном уровне, в том числе на высокой нагрузке (190–215 МВт).

Существенный рост внедрения ЦКС-технологии в мире на базе энергоблоков значительной электрической мощности (свыше 150 МВт) для сжигания угля разной степени метаморфизма (от биомассы до антрацита), в том числе низкорееакционного (антрацита, нефтяного кокса) и со значительным содержанием золы (до  $A_d < 55\text{--}60\%$ ) и серы ( $S_d < 1\text{--}5\%$ ), свидетельствует о надежности и высокой степени готовности ЦКС-котлоагрегатов, существенных экономических и экологических показателей их эксплуатации. Это подтверждает необходимость дальнейшего внедрения ЦКС-технологии на ТЭС Украины с целью реконструкции существующих и сооружения новых эффективных энергоблоков, отвечающих современным европейским нормам по выбросам вредных веществ.

### Список литературы

1. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю. Экологически чистые технологии сжигания и газификации высокозольных углей в кипящем слое // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2001. — № 5. — С. 3–10.
2. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Топал А.И. Современное состояние развития чистых угольных технологий в энергетике // Там же. — 2009. — № 4. — С. 80–88.
3. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Топал А.И. Экологически чистые угольные энерготехнологии. — Киев: Наук. думка, 2004. — 187 с.
4. Стогній Б.С., Корчевой Ю.П., Майстренко О.Ю. Шляхи радикального підвищення ефективності використання вугілля на теплових електростанціях // Стратегія енергозбереження в Україні: Аналіт.-довід. матеріали. Т.1: Загальні засади



- енергозбереження. — Київ : Академперіодика, 2006. — С. 430–449.
5. Maystrenko A.Yu., Gummel P., Cross P.J. The Ukrainian Strategy — Combustion Test and Design Philosophy for a 200 MWe Power Plant Firing Antracite // Power-Gen Europe-96 (Budapest, Hungary, 1996). — 1996. — Vol. 2. — Track 5: Connects and Renewable Technologies.. — P. 1–20.
6. Korchevoy Yu.P., Levin M.M., Maystrenko A.Yu., Yatskevich S.V. Adaptation of combustion technology in a circulating fluidized bed for coals with high ash contents in Ukraine // Proc. Workshop on Development of Clean Small-size Boilers for Industrial, Households and Farming Sectors. United Nations Economic Commission for Europe. — Szczyrk, Poland, 1995. — P. 159–172.

Поступила в редакцию 10.10.11

## The Technology Implementation of High Ash Anthracite and its Rejects Combustion in Circulating Fluidized Bed at Starobeshevo Power Plant Power Unit № 4 (210 MW)

**Bely G.V.<sup>1</sup>, Ivanov V.I.<sup>2</sup>, Korchevoy Yu.P.<sup>3</sup>, Maystrenko A.Yu.<sup>3</sup>, Smirnov I.Ch.<sup>4</sup>, Topal A.I.<sup>3</sup>, Shevchenko V.A.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> PSC «Centrenergo», Kiev

<sup>2</sup> PSC «Donbasenergo» Starobeshevo Power Plant, Donetsk

<sup>3</sup> Coal Energy Technology Institute of NASU, Kiev

<sup>4</sup> PSC «Donbasenergo», Donetsk

The experience of the first in Ukraine and Commonwealth of Independent States implementation of significant electric capacity power unit (210 MW) with circulating fluidized bed boiler (CFB) with steam capacity of 670 t/hour is considered. The CFB-boiler is designed for high ash anthracite (up to 55%) schlamm, anthracite, and coal rejects as well as their blend combustion. The technological scheme of CFB-process is described. The features of the boiler steam and water system and fuel handling systems are considered. The analysis of the main measures completed during CFB-technology commissioning of the technology modernization and improvement is executed.

**Key words:** coal, rejects, ash, schlamm, circulating fluidized bed.

Received October 10, 2011

УДК 621.18

## Энергоэкологические аспекты применения роторных гидродинамических парогенераторов с внутренней сепарацией паровой фазы

**Горпинко Ю.И., Кравченко О.В.**

*Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков*

Представлены конструкции и рабочие режимы существующих парогенераторов гидродинамического нагрева с внутренней сепарацией паровой фазы. Предложены простейшие гидродинамические и тепловые модели процессов испарения жидкостей в них. Показана возможность создания эффективных и экономичных источников тепла малых мощностей на основе прямого преобразования возобновляемой энергии потоков воды. Обоснована целесообразность применения гидродинамических парогенераторов с электроприводом для теплоснабжения непрерывных химических производств попеременно с когенерационными установками в часы суточного падения потребления электроэнергии.

**Ключевые слова:** парогенератор, ротор, гидродинамический нагрев, кавитационные тепловыделения, вращающееся кольцо жидкости, возобновляемая энергия.