

**ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ**

**ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ
НА СУПЕРСВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА И ПЕРСПЕКТИВЫ
СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ ССКП В РОССИИ**

© 2021 г. Е. В. Сомова^а, *, А. Н. Тугов^а, А. Г. Тумановский^а

^аВсероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

*e-mail: evsomova@vti.ru

Поступила в редакцию 23.10.2020 г.

После доработки 11.11.2020 г.

Принята к публикации 23.12.2020 г.

В ближайшие годы производство электроэнергии в мире в значительной степени будет осуществляться с использованием угля в качестве топлива (угольная генерация). Некоторые европейские страны, США, Канада и Япония стремятся сократить количество угольных энергоблоков с полной их ликвидацией к 2030 г. В то же время страны Азиатско-Тихоокеанского региона, в основном Китай и Индия, широко развивают технологию производства пара на суперсверхкритические параметры (ССКП) с помощью угля, которая позволяет повысить эффективность выработки электроэнергии и сократить выбросы вредных веществ в атмосферу. На сегодняшний день в мировой энергетике параметры пара составляют: давление примерно 30 МПа, температура около 610/620°C. Коэффициент полезного действия достигает 47%. Представлен обзор разработок конструкций пылеугольных энергетических котлов ССКП крупнейших зарубежных фирм – производителей котельного оборудования в Европе (Alstom), Японии (Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ishikawajima-Harima Heavy Industries) и Китае (Harbin Boiler Co. Ltd, Dongfang Boiler Co. Ltd и Shanghai Boiler Works Ltd). Россия находится на 10-м месте в мире по объему выработки электроэнергии на угле. Доля угольной генерации в нашей стране в 2016 г. составляла около 13.5%. Разработка технических решений по энергоблоку ССКП была предпринята в России в начале века. Заводы – изготовители котельного оборудования прорабатывали проекты котлов, в которых могли сжигаться угли различных типов, для энергоблока мощностью 660 МВт. Для сооружения головного энергоблока ССКП необходимы совместные усилия правительства, энергетиков, металлургов, научных организаций и производителей оборудования.

Ключевые слова: угольная генерация, пылеугольный энергоблок, суперсверхкритические параметры пара, котел, горелочное устройство, промежуточный перегрев, экранирование, выбросы вредных веществ

DOI: 10.1134/S0040363621060096

Угольная генерация продолжает играть основную роль в обеспечении человечества электроэнергией. Использование угля в качестве топлива в 2017 г. обеспечило около 38% мировой выработки электроэнергии, в некоторых странах (Китае, Индии, Польше и ЮАР) она составила более 2/3 общего объема. В то же время угольные ТЭС являются главным источником выбросов парниковых газов и других вредных веществ в атмосферу. Радикально уменьшить эти выбросы при производстве электроэнергии можно сокращением или даже полной ликвидацией угольной генерации с переходом на низкоуглеродную энергетику. По такому пути идут США, Канада, некоторые европейские страны, Япония. Например, по данным [1], в Японии по состоянию на апрель 2018 г. эксплуатировалось 117 угольных энергоблоков об-

щей установленной электрической мощностью 44 119 МВт, в том числе 25 энергоблоков ССКП, составляющих примерно половину этой мощности (19 960 МВт). Тем не менее, к 2030 г. планируется вывод из эксплуатации всех угольных энергоблоков: докритического давления – к 2022 г., сверхкритического давления (СКД) – к 2025 г., на суперсверхкритические параметры пара – к 2030 г.

Великобритания, Финляндия, Австрия, Бельгия, Канада и Франция также поставили перед собой цель ликвидировать угольные электростанции к 2030 г. Германия, производящая 40% своей энергии с использованием угля, обещает за этот же период (до 2030 г.) закрыть более половины угольных ТЭС. С 2011 по 2016 г. в США было выведено из эксплуатации более 61 ГВт угольной ге-

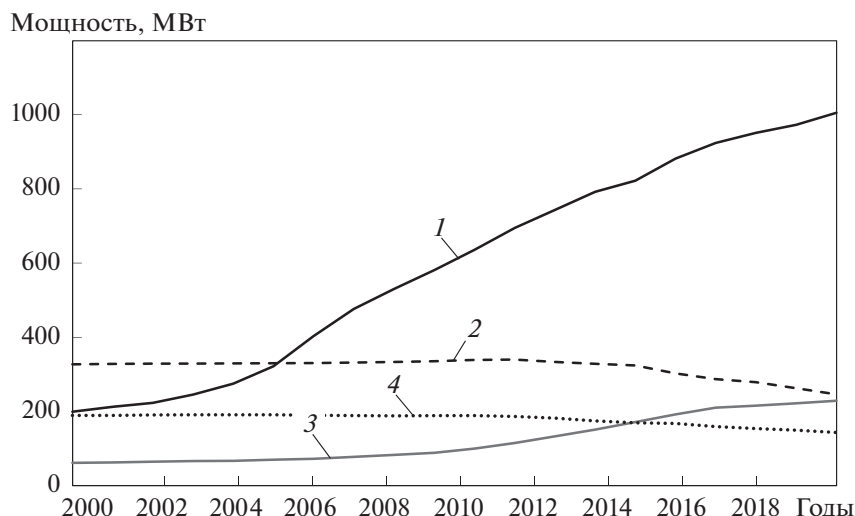


Рис. 1. Динамика развития угольной генерации по данным [2].
1 – Китай; 2 – США; 3 – Индия; 4 – страны ЕС

нерации, к 2030 г. прогнозируется сокращение угольной энергетики еще на 65 ГВт.

Другой путь снижения на угольных электростанциях выбросов вредных веществ, прежде всего парниковых газов (CO₂), – повышение КПД ТЭС. Наиболее перспективной в этом направлении является выработка электроэнергии на энергоблоках высокой эффективности, например на супер- и сверхкритических параметрах пара. По этому пути идут страны Азиатско-Тихоокеанского региона, в первую очередь Китай и Индия, где сосредоточено более 70% мировой угольной генерации. В этих странах она играет доминирующую роль и на долгосрочную перспективу останется преобладающей (рис. 1).

Согласно классификации, принятой в отечественной электроэнергетике, энергоблоками ССКП (по терминологии [3] на суперкритические параметры пара – СКП) считаются установки давлением 26–32 МПа, температурой свежего пара 585–620°C и пара промежуточного перегрева 585–650°C (за котлом). В Японии давление установок ССКП составляет 24.1–31.0 МПа, температура 593/593–600/620°C.

В табл. 1 показано, как эффективность работы пылеугольных энергоблоков при сжигании битуминозного угля зависит от параметров пара. Эффективность энергоблоков ССКП на 4–6% выше аналогичных на докритическом давлении. При повышении температуры свежего пара на 50°C КПД установки увеличивается примерно на 1%.

Первые угольные энергоблоки ССКП были запущены в работу еще в середине прошлого века. В 1957 г. в Великобритании и США были введены в эксплуатацию энергоблоки Drakelow С мощностью 375 МВт и Philo мощностью 125 МВт (параметры свежего пара 31 МПа, 610°C). С 1959 г. работает энергоблок Eddystone 1, рассчитанный на параметры пара 34.5 МПа, 650°C (которые впоследствии были снижены до 32.4 МПа, 605°C). В СССР в 1963 г. на Каширской ГРЭС введен в эксплуатацию энергоблок СКР-100, рассчитанный на сжигание подмосковного угля, с параметрами свежего пара 30 МПа, 650°C. Однако началом успешной коммерческой эксплуатации энергоблоков ССКП обычно считают запуск в 1993 г. газомазутного энергоблока № 4 мощностью 1000 МВт на ТЭС Нироно в Японии (в настоящее время выведен из эксплуатации).

Интенсивный рост числа энергоблоков ССКП стал наблюдаться с 2006 г., и он связан с широко-масштабным строительством их в Китае [4]. Дело в том, что в 2006 г. Национальная комиссия реформ и

Таблица 1. Эффективность пылеугольных энергоблоков

Тип энергоблока	Температура пара перегретого и промежуточного перегрева, °С	Давление перегретого пара, МПа	КПД, %
Докритического давления	До 565	Менее 22.1	35–41
СКД	540–580	22.1–25.0	38–44
ССКП	Более 580	Более 25.0	Более 44

Таблица 2. Действующие угольные энергоблоки ССКП в Японии

Энергоблок	Мощность, МВт	Поставщик оборудования	Давление, МПа	Температура, °С	Год пуска
Hekinan unit № 3	700	ИНИ	24.6	538/598	1993
Noshiro unit № 2	600	ИНИ	24.6	566/598	1994
Nanao Ohta unit № 1	500	ВНК	24.1	566/593	1995
Haramachi unit № 1	1000	МНИ	24.5	566/593	1997
Matsuura unit № 2	1000	ВНК	24.1	593/593	1997
Misumi unit № 1	1000	МНИ	24.5	600/600	1998
Haramachi unit № 2	1000	ВНК	24.5	600/600	1998
Nanao Ohta unit № 2	700	ИНИ	24.1	593/593	1998
Tachibana-wan unit № 1	700	ВНК	24.1	566/593	2000
Tachibana-wan unit № 1	1050	ИНИ	25.0	600/610	2000
Tsuruga unit № 2	700	МНИ	25.5	593/593	2000
Tachibana-wan unit № 2	1050	ВНК	25.0	600/610	2000
Karita new unit № 1	360	ИНИ	24.2	566/593	2000
Hekinan unit № 4	1000	ИНИ	24.1	566/593	2001
Isogo new unit № 1	600	ИНИ	26.1	600/610	2002
Tomatoh-Atsuma unit № 4	700	ИНИ	25.0	600/600	2002
Hekinan unit № 5	1000	ИНИ	24.1	566/593	2002
Reihoku unit № 2	700	МНИ	24.1	593/593	2003
Hitachi-Naka unit № 1	1000	ВНК	24.5	600/600	2003
Hirono unit № 5	600	МНИ	24.5	600/600	2004
Maizuru unit № 1	900	МНИ	24.5	595/595	2004
Isogo new unit № 2	600	ИНИ	27.5	600/620	2009
Maizuru unit № 2	900	ИНИ	24.5	595/595	2010
Hirono unit № 6	600	МНПС	24.5	600/600	2013
Hitachi-Naka unit № 2	1000	МНПС	24.5	600/600	2013

развития Китая постановила, что на новых угольных энергоблоках мощностью от 600 МВт должны применяться технологии СКД и ССКП, и уже к концу 2008 г. в этой стране работало примерно 100 энергоблоков СКД/ССКП [5]. На начало 2013 г. в Китае эксплуатировалось 119 энергоблоков ССКП электрической мощностью более 600 МВт, что сделало его страной с наибольшим количеством таких энергоблоков в мире. В [6] указывается, что к концу 2017 г. в Китае уже должно было эксплуатироваться 247 угольных энергоблоков ССКП, в том числе 146 мощностью более 1000 МВт. В 2019 г. установленная электрическая мощность угольных ТЭС Китая составила 1004948 МВт [2]. Примерно четверть этой мощности приходилась на угольные энергоблоки ССКП.

Сейчас в мире работает более 350 энергоблоков ССКП, причем примерно 80% в Китае, в Японии функционируют 25 энергоблоков (табл. 2).

Помимо Японии и Китая, энергоблоки ССКП эксплуатируются также в Германии, Корее, Польше, Нидерландах, Малайзии, США, Словении и на

Тайване. В сентябре 2019 г. был запущен первый энергоблок ССКП в Индии – на ТЭС Khargone мощностью 600 МВт с параметрами пара 26.4 МПа, 600/600°С. С 1 января 2020 г. началась коммерческая эксплуатация энергоблока № 6 мощностью 660 МВт на электростанции в Ledvice (Чехия).

Основными поставщиками котельного оборудования для энергоблоков ССКП в настоящее время являются японские фирмы Mitsubishi Hitachi Power Systems (МНПС), объединившая в 2014 г. Babcock-Hitachi К.К. (ВНК) и Mitsubishi Heavy Industries (МНИ), и Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co. Ltd (ИНИ), французская фирма Alstom-EUT (с 2015 г. в составе американской компании General Electric) и китайские фирмы Harbin Boiler Co. Ltd (HBC), Dongfang Boiler Co. Ltd (DBC) и Shanghai Boiler Works Ltd (SBWL).

КОТЛЫ ЯПОНСКИХ ФИРМ

В Японии атомная энергетика является основным источником электроэнергии. Поэтому уголь-

ные энергоблоки должны обладать маневренными характеристиками для частых циклов изменения нагрузки. В Японии нет собственных угольных ресурсов и электростанции вынуждены использовать импортируемые угли. В зависимости от рыночных цен на уголь поставщики приобретают его в разных странах мира. Последнее обстоятельство вынуждает компании MHP и IHI разрабатывать собственные оригинальные конструкции котлов, позволяющие сжигать каменные угли, антрациты и лигниты (бурые угли). Например, котел фирмы MHP на ТЭС Hitachi-Naka приспособлен для сжигания углей разных марок из Австралии, Индонезии, Китая, США и Канады.

Среди других проектов этой компании – котел, сжигающий бурый уголь влажностью до 30%, для энергоблока 866 МВт ТЭС Paiton II в Индонезии, котел для сжигания высоковлажных лигнитов энергоблока Vohberg R (Германия) мощностью 670 МВт, котел для энергоблока 700 МВт ТЭС Rajpara (Индия), где используется каменный уголь зольностью до 30%.

Всего компания MHP поставила котлы, сжигающие различные угли, для 153 энергоблоков СКД и ССКП [7]. Из них 50 котлов изготовлены в Китае и Индии по лицензии. Распределение поставок оборудования по странам следующее: Япония – 26 котлов, Китай – 63, Индия – 13, Южная Африка – 12, Германия – 9, Тайвань – 8, США – 4, Южная Корея – 4, Италия – 3. По одному-два котла компания поставляла в Польшу, Канаду, Индонезию Австралию, Мексику и другие страны.

Котлы японских фирм имеют П-образную или башенную компоновку и, как правило, оборудуются топками с твердым шлакоудалением. Для уменьшения шлакования и коррозии топочных экранов тепловые напряжения объема и сечения топки снижены. Котлы башенной компоновки для энергоблоков ССКП имеют меньшие габариты и могут использоваться при установке нового оборудования взамен устаревшего в стесненных условиях. Такие котлы японские компании представляют главным образом в европейские страны, например в Германию на ТЭС Vohberg R, Neurath, Lünen (рис. 2) и др.

В Японии котлы ССКП имеют в основном П-образную компоновку (рис. 3), исключая энергоблоки № 1, 2 ТЭС Isogo, где компания IHI использовала башенный тип. Преимущества П-образной компоновки согласно [10] заключаются в следующем:

возможность выбора сечения конвективной шахты из условия обеспечения оптимальной скорости дымовых газов;

вертикальное расположение пароперегревателя, что способствует меньшему шлакованию поверхностей нагрева и использованию более ши-

рокого диапазона углей, включая угли с высокими шлакующими свойствами;

поддержание более высокой температуры на выходе из топки из-за меньшего шлакования, что положительно влияет на эффективность теплопередачи в пароперегревателе.

Горизонтально расположенные конвективные поверхности башенных котлов, размещенные на подвесных трубах, имеют коридорную компоновку трубных пучков и выполняются наподобие ширм. Это упрощает подвеску поверхностей нагрева и позволяет организовать их эффективную очистку.

Регулирование температуры пара промежуточного перегрева осуществляется изменением пропуска дымовых газов через пакеты промежуточного пароперегревателя при конструкции конвективной шахты в виде параллельных газопроводов (“расщепленный хвост”) (см. рис. 2, 3). Расход газов через промежуточный пароперегреватель регулируется установленными после него жалюзийными заслонками. В котлах, оборудованных топкой с тангенциальной компоновкой поворотных горелок, регулирование температуры осуществляется изменением угла наклона оси горелок к горизонтали.

Для стен топочной камеры применяется комбинированное и вертикальное экранирование (рис. 4). Изначально для прямоточных котлов применялась комбинированная схема – спиральная навивка труб в нижней части топки и вертикальные панели из труб в верхней части. Спиральная навивка позволяла выполнить поверхность нижней радиационной части (НРЧ) в один ход, что особенно актуально для котлов с малой паропроизводительностью. Заходы ленты, охватывая весь периметр топки, проходят области как высоких, так и пониженных температур топочных газов и имеют минимальную тепловую неравномерность. Однако топочные экраны этих котлов обладают большим сопротивлением из-за высоких массовых скоростей и большой длины труб.

Для котлов мощных энергоблоков одноходовая экранная система из вертикальных труб имеет меньшее сопротивление, и затраты на собственные нужды питательного насоса снижены по сравнению со спиральной навивкой благодаря меньшим массовым скоростям и длине труб. Более простая структура вертикальных панелей упрощает их подвеску, что повышает надежность работы и облегчает при необходимости их ремонт и замену. Вертикальные экраны меньше подвержены загрязнению и шлакованию. Гидравлические потери трения при течении среды в вертикальных трубах невелики по сравнению с общими потерями давления, поэтому разверки расхода среды по отдельным трубам незначительны, что

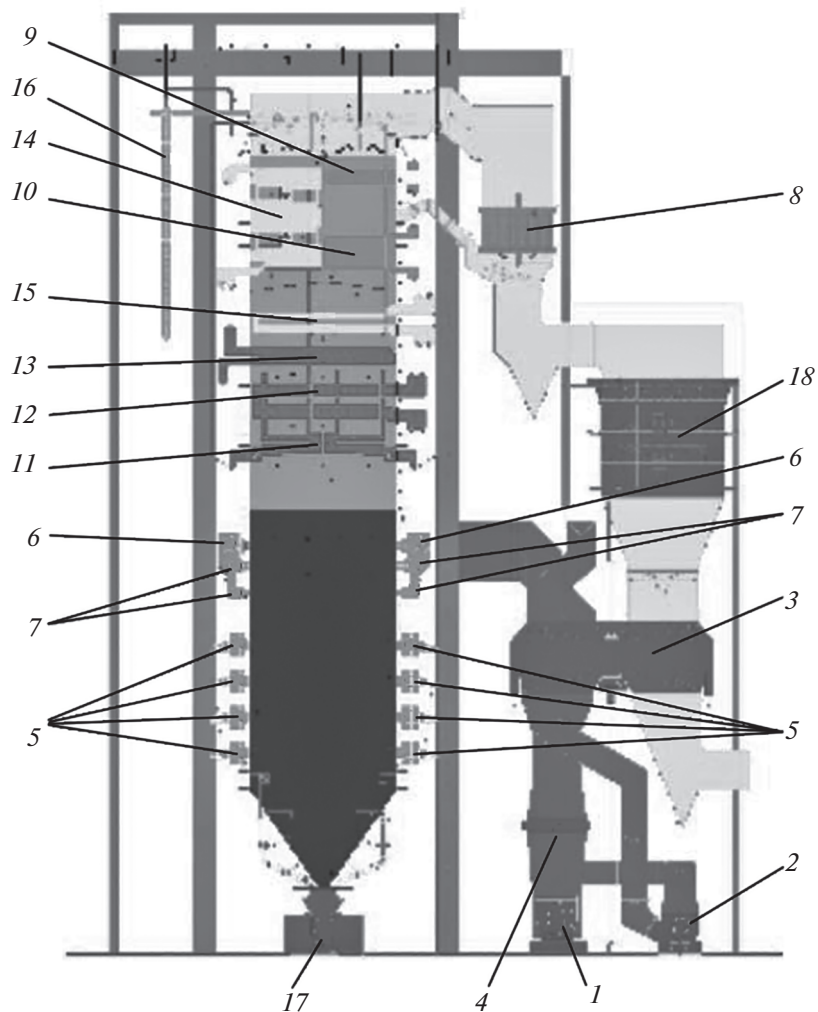


Рис. 2. Башенный котел ИНИ ТЭС Lünen (Германия) [8].

1, 2 – дутьевой вентилятор первичного и вторичного воздуха; 3 – регенеративный воздухоподогреватель; 4 – калорифер; 5 – горелки; 6, 7 – верхний и боковой ввод третичного воздуха; 8, 9 – экономайзер первой и второй ступени; 10, 11, 12 – пароперегреватель первой, второй и третьей ступени; 13 – выходная ступень пароперегревателя; 14, 15 – промежуточный пароперегреватель первой и второй ступени; 16 – сепаратор со сливным коллектором; 17 – шлакоудаление; 18 – установка селективного каталитического восстановления (СКВ) оксидов азота

способствует более равномерному гидравлическому режиму котла.

Для обеспечения надежного температурного режима металла вертикальных экранных труб с меньшими массовыми скоростями среды компания МНИ предложила использовать трубы с внутренним оребрением для котлов СКД [11], разгружающихся на скользящем давлении. Использование оребрения улучшает охлаждение вертикальных экранных труб благодаря турбулизации потока и смещает границу зоны ухудшенного теплообмена в область более высоких паросодержаний вследствие орошения стенок трубы жидкой фазой в замкнутом потоке [12] (рис. 5).

Первые котлы с вертикальным экранированием были смонтированы на ТЭС Matsuura (энерго-

блок № 1 мощностью 700 МВт) в 1989 г. и энергоблоках № 1, 2 мощностью 700 МВт ТЭС Kawagoe в 1989 и 1990 гг. Котлы ССКП с вертикальными оребренными внутри трубами в Японии эксплуатируются на ТЭС Haramachi (энергоблок № 1), Misumi (энергоблок № 1), Higono (энергоблок № 5), Maizuru (энергоблок № 1). Компании ВНК и ИНИ используют в своих котлах спиральную навивку экранов из гладких труб.

В котлах применяется однобайпасная пусковая схема с насосами рециркуляции среды [13, 14], остаточное тепло при рециркуляции не испарившейся в топочных экранах воды подается обратно на вход в экономайзер. Это сокращает продолжительность пуска и обеспечивает надежную работу на низких нагрузках. Гидравлическая схема вклю-

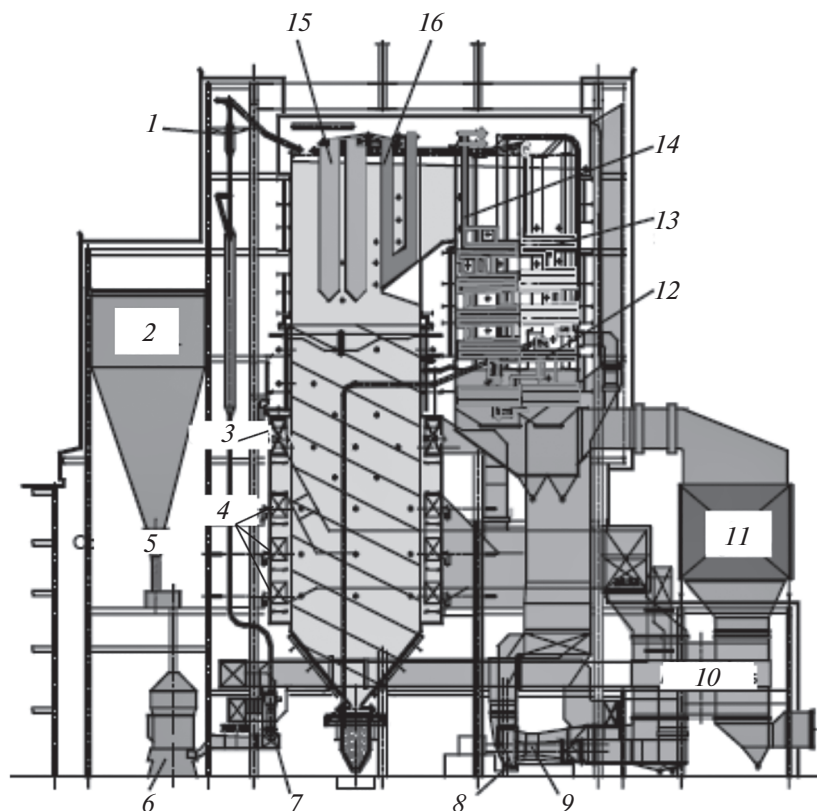


Рис. 3. П-образный котел ВНК (МНПС) энергоблока № 1 ТЭС Hitachi-Naka (Япония) [9].

1 – сепаратор пара; 2 – бункер сырого угля; 3 – сопла третичного воздуха; 4 – горелки; 5 – питатель сырого угля; 6 – мельницы; 7 – насос рециркуляции; 8 – дутьевой вентилятор; 9 – вентилятор первичного воздуха; 10 – воздухоподогреватель; 11 – установка СКВ; 12 – экономайзер; 13, 15, 16 – пароперегреватель первой, второй и третьей ступени; 14 – промежуточный пароперегреватель

чает в себя контур рециркуляции (рис. 6), состоящий из сепаратора пара и циркуляционного насоса котла, что обеспечивает стабильную работу во время пуска и останова. В случае отключения циркуляционного насоса котел может быть запущен с использованием линии от дренажного бака к конденсатору. Минимальная нагрузка котла со-

ставляет 25–35% номинальной для прямоточного режима и 15% с насосом рециркуляции.

При разработке горелочных устройств используются новые технологии экологически безопасного сжигания угля. В топочных камерах применяют тангенциальный способ сжигания угольной пыли с использованием прямоточных горелок (разработки компании МН) [15] и двухступенчатый с встречным расположением вихревых горелочных устройств (ВНК, ИИ) [16, 17].

В основу конструкции горелок серии НТ-NR (Hitachi NO_x reduction) заложен принцип сжигания, называемый “in-flame NO_x reduction”, посредством которого в пламени горелки происходит восстановление оксидов азота [16]. На рис. 7 представлен механизм сокращения выбросов оксидов азота в факеле горелки, который заключается в реакции восстановления NO_x при высоких температурах и низких избытках воздуха (зона В) сразу после воспламенения угольной пыли (зона А).

На рис. 8 [18] показана эволюция горелочных устройств на примере вихревой пылеугольной малотоксичной горелки, разработанной компа-

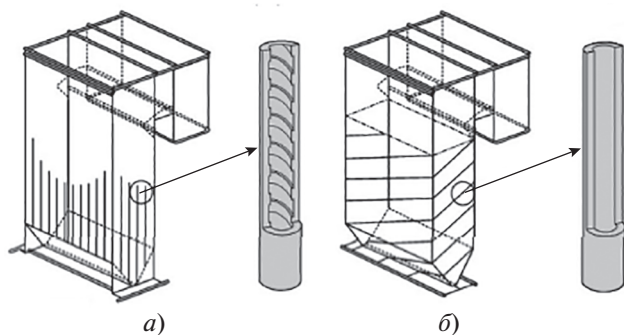


Рис. 4. Экранирование топочной камеры котла.
а – вертикальные панели с оребренными трубами;
б – спиральная навивка с гладкими трубами

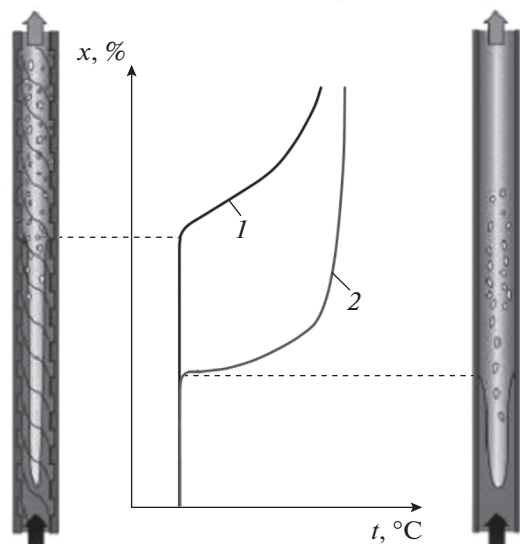


Рис. 5. Зависимость массового паросодержания x от температуры металла ребренных (1) и гладких (2) труб t

нией ВНК. В горелках серии NR3 применены направляющая гильза и кольцо стабилизации пламени с отражательной плитой. В результате этого оптимизируется схема подачи вторичного и третичного воздуха с расширением восстановительной зоны факела и дополнительным снижением выбросов NO_x . Данное техническое решение позволило снизить концентрацию NO_x по сравнению с традиционным сжиганием с 300 до 120 ppm при содержании O_2 равном 6%. Горелочные устройства NR3 впервые были использованы в котле энергоблока мощностью 1000 МВт ст. № 1 ТЭС Hitachi-Naka в Японии, находящемся в эксплуатации с декабря 2003 г. и имеющем КПД 45% [19].

В прямоточных горелках, разработанных компанией МНИ, подвод вторичного воздуха расположен сверху и снизу канала с пылевоздушной смесью. В котлах с такими горелками используется концентрическое сжигание, при котором поток вторичного воздуха отклоняется от основного потока в сторону экранов, что позволяет дополнительно организовать горизонтальное ступенчатое сжигание топлива [15]. Вверху топки над горелками расположены сопла подачи третичного воздуха.

Дальнейшее снижение выбросов NO_x происходит в установках СКВ. Кроме того, применяются технические решения, направленные на повышение эффективности их работы. Особенно важно сохранить эффективность работы устройства при низких нагрузках, когда температура газов в СКВ опускается ниже оптимальной. Для ее повышения предусматривают байпасирование водя-

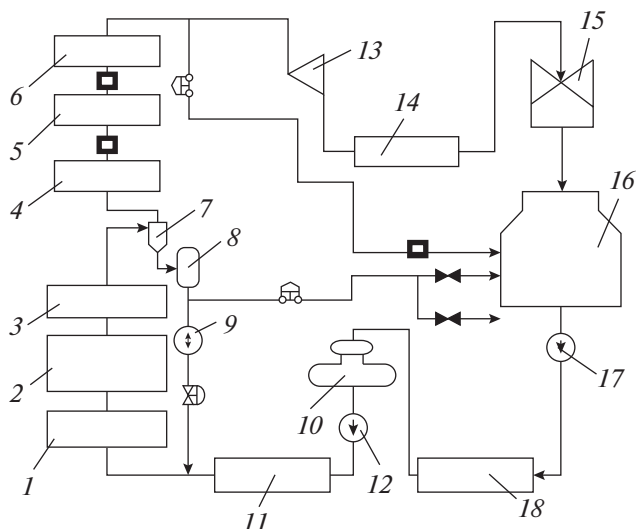


Рис. 6. Пусковая схема энергоблока с насосами рециркуляции среды.

1 – экономайзер; 2, 3 – экраны топочные и ограждения; 4, 5, 6 – пароперегреватель первой, второй и третьей ступени; 7 – сепаратор пара; 8 – сливной коллектор; 9 – насос рециркуляции среды; 10 – деаэрактор; 11 – подогреватели высокого давления; 12 – питательный насос; 13 – цилиндр высокого давления турбины; 14 – промежуточный пароперегреватель; 15 – цилиндры среднего и низкого давления турбины; 16 – конденсатор; 17 – циркуляционный насос; 18 – подогреватели низкого давления

ного экономайзера по дымовым газам, как это сделано на котлах энергоблока мощностью 813 МВт ТЭС Lünen (см. рис. 3) и энергоблока № 1 ТЭС Hitachi-Naka (см. рис. 4).

При сжигании угля на энергоблоке ТЭС Lünen (НИ) используются горелки с широким диапазоном режима работы [8]. Четыре мельницы снабжают пылью 32 вихревые горелки, расположенные встречно на фронтальной и задней стенах топки. Горелки оборудованы регулирующим кольцом в наружном корпусе для изменения распределения концентрации угольной пыли (рис. 9), что дает возможность стабилизировать горение даже при низких нагрузках. Это позволило расширить интервал

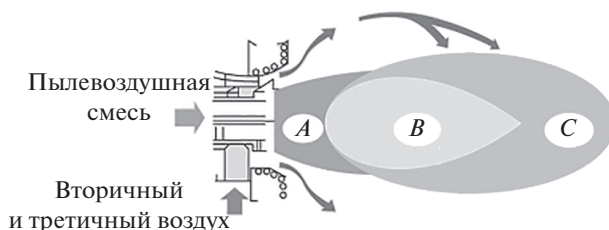


Рис. 7. Структура факела малотоксичной горелки. Зона: А – воспламенение; В – высокотемпературная восстановительная; С – дожигание

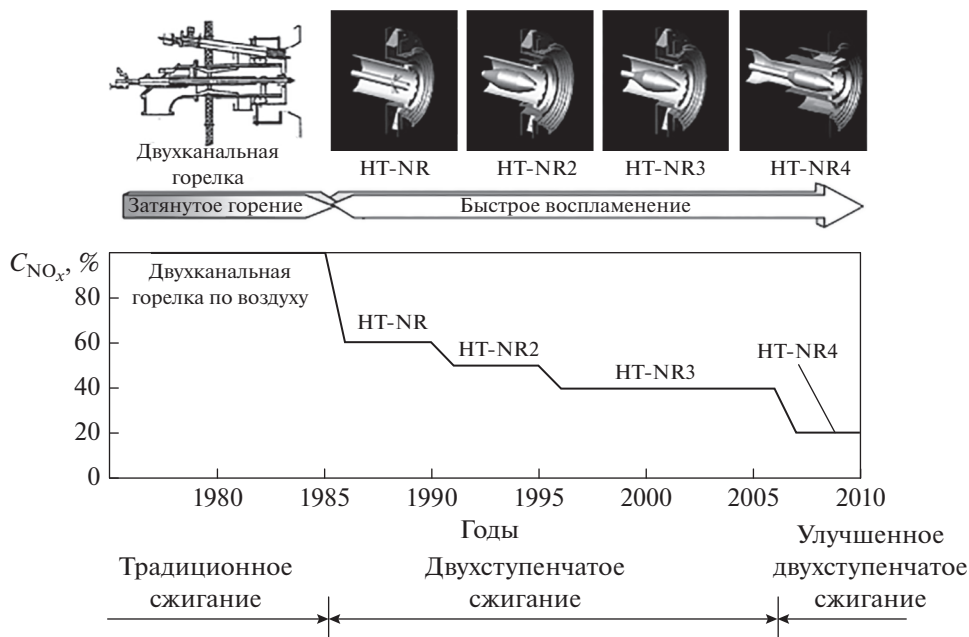


Рис. 8. Эволюция малотоксичных вихревых горелок компании ВНК и концентрация оксидов азота C_{NO_x} в выбросах

рабочих нагрузок котла в сторону их снижения при одном и том же числе работающих мельниц. Проведенными испытаниями установлено, что нагрузка энергоблока может быть снижена до 25% при работе двух мельниц. Это является показателем очень хорошей маневренности, а также позволяет сократить расход растопочного топлива при пусках/остановах энергоблока и для подсветки факела мазутом при работе на низких нагрузках [8].

В Китае котлы японских фирм МНІ и ВНК изготавливались соответственно заводами НВС и ДВС по лицензии, а затем послужили основой для создания этими заводами котлов ССКП собственных конструкций.

КОТЛЫ ФИРМЫ ALSTOM-EUT

Французская фирма Alstom-EUT (с 2015 г. в составе американской компании General Electric) является мировым лидером в области производства оборудования для тепловых электростанций на сверх- и суперсверхкритические параметры пара, в том числе котлов для энергоблоков общей мощностью свыше 40 ГВт, строящихся и эксплуатируемых во многих странах мира. На рис. 10 показан общий вид котлов Alstom на суперсверхкритические параметры пара, работающих на лигнитах, угольной пыли, биомассе, природном газе. Далее приведены предельные значения основных параметров:

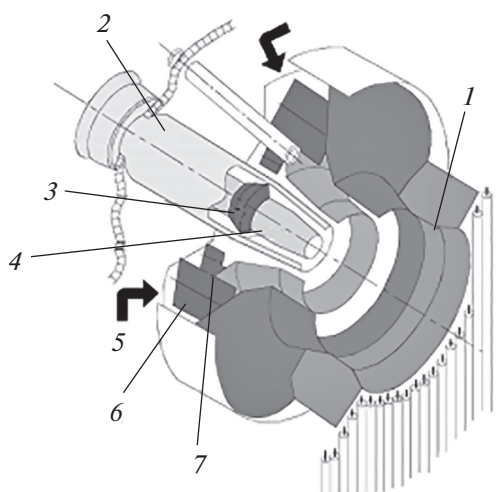


Рис. 9. Пылеугольная горелка ИПІ.
 1 – амбразура горелки; 2 – канал подачи аэросмеси;
 3 – регулирующее кольцо; 4 – внутренняя втулка;
 5 – вторичный воздух; 6, 7 – лопатки наружного и внутреннего воздушного канала

Мощность, МВт	1200
Давление пара, МПа	28.5
Температура, °С:	
пара	605
пара промежуточного перегрева	621

Котел башенной компоновки высотой, как правило, более 100 м. Экранирование топочной камеры – комбинированное со спиральной навивкой труб в нижней части топки и вертикаль-

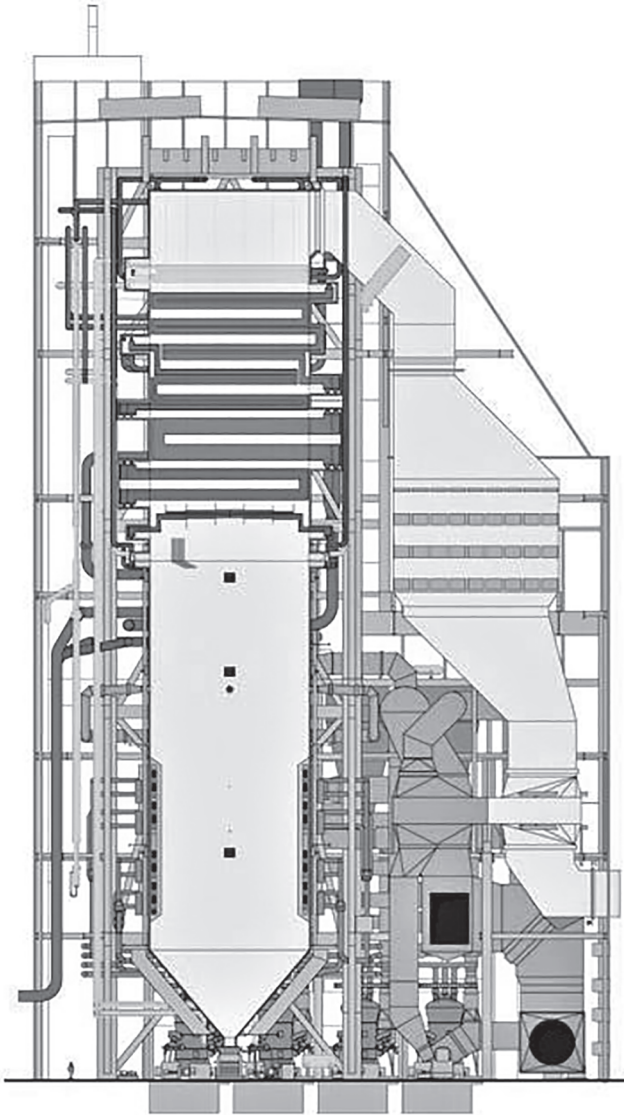


Рис. 10. Типовой котел ССКП производства фирмы Alstom-EUT

ное в верхней. Переход от спиральной навивки к вертикальным трубам осуществляется с помощью раздающих тройников (рис. 11, *а*) без перемешивания в собирающих коллекторах. При этом

изменяются шаг и ширина проставки, а число параллельно включенных труб увеличивается в 2 или 3 раза. Переход от верхней радиационной части (ВРЧ) топки к экранам газохода осуществляется посредством собирающих тройников (рис. 11, *б*). При этом изменяется диаметр труб и шаг между ними возрастает в 2 раза. Подобная схема использована фирмой Alstom на энергоблоке “К” ТЭС Niederaussem (Германия).

Регулировочный диапазон нагрузки котла 100–30%, разгрузка производится на скользящем давлении. Топка оснащена прямоточными угловыми поворотными горелками с тангенциальной компоновкой, размещенными в два яруса. Общий вид горелки одного из котлов представлен на рис. 12. Для уменьшения содержания оксидов азота в продуктах сгорания топлива применен ступенчатый подвод воздуха по вертикали (рис. 13, *а*), а иногда и по горизонтали (рис. 13, *б*) [20].

Для повышения КПД котла организована система регенерации тепла уходящих газов (рис. 14). Регенеративный воздухоподогреватель (РВП) имеет байпас, в котором размещен байпасный экономайзер LUBECO (luvo bypass economiser) [21]. Через него проходит около 1/3 количества дымовых газов. В верхней секции байпасного экономайзера подогревается питательная вода параллельно подогревателям высокого давления (ПВД). Нижние секции байпасного экономайзера используются в контуре естественной циркуляции для выработки пара, подаваемого в последний перед деаэратором подогреватель низкого давления (ПНД). Далее оба потока уходящих газов объединяются и проходят через электрофильтр, охладитель газов, установку десульфуризации и выбрасываются в атмосферу через градирню. В охладителе температура газов снижается со 160 до 100°C, при этом 77.9 МВт тепла передается в тракт подогрева воздуха. Благодаря предварительному подогреву воздуха уменьшается количество тепла, передаваемого в РВП, вследствие чего высвобождается тепло дымовых газов для нагрева конденсата и питательной воды. Такая схема позволяет сократить отбор пара из турбины на ПНД и ПВД и увеличить выработку электроэнергии.

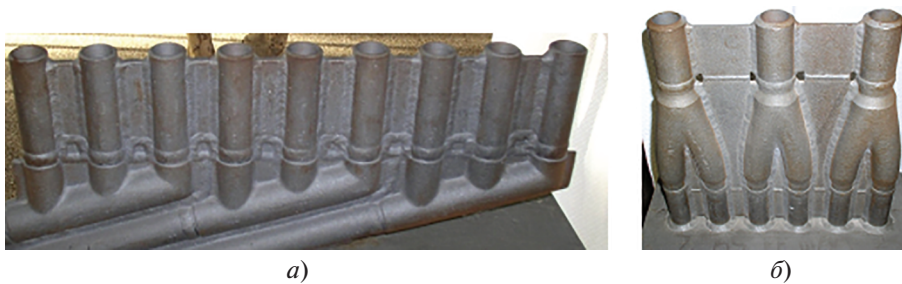


Рис. 11. Бесколлекторный переход от спиральной навивки к вертикальным трубам (*а*) и от вертикальных труб к экранам ограждения конвективной шахты (*б*)

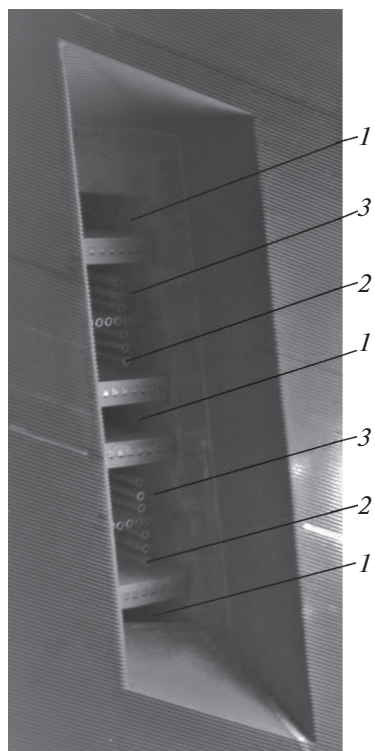


Рис. 12. Общий вид горелочного устройства Alstom. 1 – вторичный воздух; 2 – первичный воздух; 3 – пылегазовая смесь

Одна из ступеней конвективного пароперегревателя выполнена по системе “трифлюкс”: регулирование температуры пара промежуточного перегрева происходит газопаро-паровым теплообменником, установленным в рассечку между ступенями промежуточного пароперегревателя. Для снижения расхода электроэнергии на собственные нужды поверхности нагрева выполнены с минимальным гидравлическим сопротивлением: по тракту ССКП 3.6 МПа, по тракту вторичного пара 0.2 МПа.

В последние годы компания Alstom реализовала и заключила несколько крупных контрактов на поставку оборудования, в том числе котельного, для энергоблоков ССКП. На угольной электростанции Rheinhafen-Dampfkraftwerk в г. Карлсруэ, Германия, в 2014 г. в эксплуатацию пущен энергоблок № 8 мощностью 912 МВт с параметрами свежего пара 27.5 МПа, 600°C и пара промперегрева 5.8 МПа, 620°C с КПД установки более 46% [22]. Входящий в его состав котел предназначен для сжигания каменных углей в большом ассортименте, преимущественно импортруемых. Тангенциальная топка оснащена угловыми поворотными горелками, что позволило регулировать температуру вторичного пара для минимизации расхода на впрыск в широком диапазоне нагрузок. Для снижения образования оксидов азота применен ступенчатый подвод воздуха по высоте (воздушные сопла) и по сече-

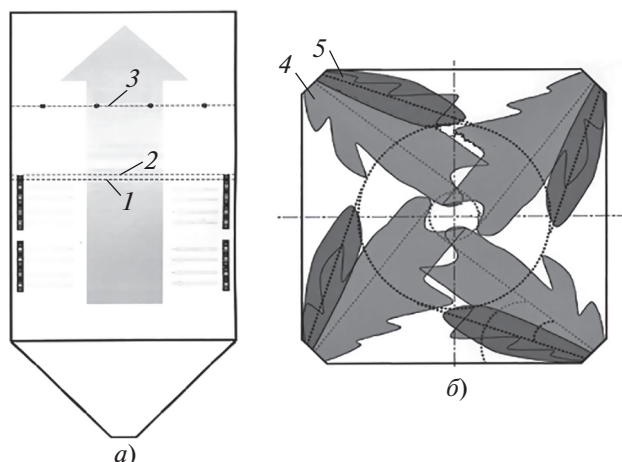


Рис. 13. Ступенчатый подвод воздуха по вертикали (а) и горизонтали (б). Избыток воздуха: 1 – 0.95; 2 – 1.00; 3 – 1.15; 4 – угольная пыль и вторичный воздух; 5 – отклоненная часть воздуха

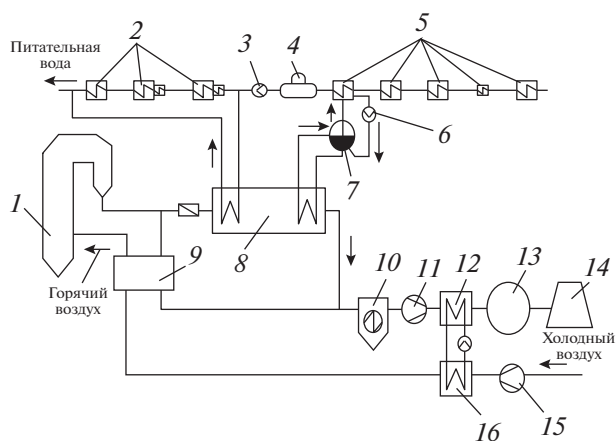


Рис. 14. Упрощенная схема использования тепла уходящих газов. 1 – котел; 2 – подогреватели высокого давления; 3 – питательный насос; 4 – деаэратор; 5 – подогреватели низкого давления; 6 – насос; 7 – барабан-сепаратор; 8 – байпасный экономайзер LUBECO; 9 – РВП; 10 – электрофильтр; 11 – дымосос; 12 – охладитель газов; 13 – сероочистка; 14 – градирня; 15 – дутьевой вентилятор; 16 – калорифер

нию посредством отклонения струи вторичного воздуха к стенам топки. Выбросы оксидов азота NO_x и углерода CO составляют соответственно менее 100 и 150 мг/м³.

В 2015 г. на угольной электростанции Grosskraftwerk Mannheim AG в земле Баден-Вюртемберг, Германия, был сдан в эксплуатацию энергоблок № 9 электрической мощностью 911 МВт с котлом Alstom на каменном угле с параметрами пара 29.0/5.8 МПа и 600/610°C и КПД 46.4%, ко-

торый обеспечивает 25% энергоснабжения региона Рейн-Неккар.

На угольной электростанции в Ополе на юго-западе Польши для польской генерирующей компании PGE (Polska Grupa Energetyczna) были пущены два новых энергоблока ССКП мощностью 900 МВт на каменном угле [23]. Их КПД составляет более 46%. После ввода в эксплуатацию энергоблока № 5 в 2018 г., энергоблока № 6 в мае 2019 г. ТЭС в Ополе стала третьей по мощности электростанцией в Польше. Благодаря двум новым энергоблокам выбросы CO_2 по стране снизятся на 2,5 млн т/год.

В одном из последних крупных проектов Alstom, уже в составе General Electric, совместно с ACWA Power и Harbin Electric International участвует в поставке котельного и турбинного оборудования для ТЭС Hassyun в Дубае (ОАЭ). На электростанции будут сооружены четыре энергоблока мощностью 600 МВт каждый на параметры пара 28,0 МПа, 600/610°C, которые предполагается сдать в эксплуатацию с 2020 по 2023 г. [24]. Котел предназначен для сжигания бурого угля из Южной Африки и Индонезии и природного газа в качестве резервного топлива. Для уменьшения выбросов вредных веществ в котельной установке будут применены усовершенствованные электрофильтры, система десульфуризации дымовых газов с использованием морской воды, малотоксичные горелки и установки СКВ, причем выбросы NO_x на энергоблоке должны соответствовать выбросам при работе на природном газе.

В Китае котлы конструкции Alstom-EUT по лицензии изготавливает котельное предприятие SBWL в Шанхае.

ПРОИЗВОДСТВО КОТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ ССКП В КИТАЕ

В 2002 г. Министерство науки и технологий Китая запустило специальный проект, направленный на изучение зарубежных технологий ССКП и разработку собственных китайских технологий. Спустя четыре года 28 ноября 2006 г. в рамках этого проекта на электростанции Huaneng Yuhuan в провинции Чжэцзян был пущен в эксплуатацию первый в Китае угольный энергоблок ССКП мощностью 1000 МВт с параметрами пара 26,25 МПа, 600/600°C. Эффективность выработки электроэнергии на этом энергоблоке составила 45,4%, удельный расход условного топлива 292,99 г/(кВт·ч), что было намного ниже среднего уровня по стране 342 г/(кВт·ч). Котел П-образной компоновки с двухъярусным расположением горелок и организацией тангенциального сжигания был изготовлен компанией Harbin Boiler Co. Ltd (HBC) по технологии япон-

ской фирмы МНН. Топка котла сформирована из вертикальных панелей труб.

В том же году при расширении электростанции Shandong Zouxian (провинция Шаньдун) для ее третьей очереди были использованы энергоблоки ССКП мощностью 1000 МВт (за котлом 26,25 МПа, 603/603°C, перед турбиной 25 МПа, 600/600°C). Пуск первого энергоблока состоялся 4 декабря 2006 г., второго — 5 июля 2007 г. КПД энергоблоков третьей очереди составил 45,5%, удельный расход топлива — 270 г/(кВт·ч) (брутто), 282 г/(кВт·ч) (нетто). Основной поставщик котлов третьей очереди — компания DBC. Компоновка П-образных котлов высотой 78 м этих энергоблоков открытая. На фронтальной и задней стенках топки котла расположены в три яруса 48 горелок, выше над горелками находятся воздушные сопла. С помощью низкоэмиссионных горелок и ступенчатого сжигания обеспечивается концентрация NO_x в дымовых газах после котлов на уровне 350 мг/м³. В системе пылеприготовления применены шаровые барабанные мельницы.

Шанхайская электростанция Waigaoqiao № 3, которая была введена в промышленную эксплуатацию в 2008 г., считается наиболее эффективной в Китае с котлами ССКП на угле с однократным промежуточным перегревом. В состав ТЭС входят два энергоблока мощностью 1000 МВт с параметрами пара 27 МПа, 600/600°C. В результате внедренных инновационных технологических решений эффективность энергоблока была повышена до 46,5%, удельный расход условного топлива составил 280 г/(кВт·ч). Башенный котел с топкой с тангенциальной компоновкой горелок и твердым шлакоудалением был изготовлен корпорацией SBWL по лицензии компании Alstom-EUT.

Котлы для этих электростанций и других ТЭС изготовлены тремя ключевыми производителями котельного оборудования в Китае — SBWL, HBC и DBC. К середине 2008 г. эти предприятия были обеспечены заказами на изготовление 134 котлов ССКП (табл. 3).

Компания DBC изготовила всего 120 котлов ССКП, в том числе 37 для энергоблоков мощностью более 1000 МВт [26]. Котлы установлены на ТЭС Shandong Zouxian, Huaneng Qinbei, Suizhong, Guodian Beilun и др. Компания SBWL поставила 46 котлов башенной компоновки и 18 котлов П-образной компоновки для энергоблоков ССКП мощностью 1000 МВт на ТЭС Shanghai Waigaoqiao, Shanghai Caojing, Tianjin Beijiang, Ninghai Coal и др. Фирма SBWL была первой в Китае, которая изготовила котлы башенного типа по собственной технологии для энергоблоков СКД мощностью 660 МВт (электростанция Gouwang Hani № 4) и ССКП (электростанция Pingshan № 1). Первый в мире паровой котел с двойным перегревом для энергоблока ССКП мощностью 1000 МВт (элек-

Таблица 3. Котлы ССКП, заказанные к изготовлению в Китае к концу мая 2008 г. [25]

Поставщик	Мощность котла, МВт					
	1000		660		600	
	количество котлов	мощность заказа, ГВт	количество котлов	мощность заказа, ГВт	количество котлов	мощность заказа, ГВт
Harbin Boiler Co. Ltd	16	16.0	18	11.9	10	6.0
Shanghai Boiler Works Ltd	36	36.0	16	10.6	—	—
Dongfang Boiler Co. Ltd	28	28.0	10	6.6	—	—
Beijing B&W	4	4.0	2	1.3	4	2.4
Итого	84	84.0	46	30.4	14	8.4

тростанция Taizhou № 3), а также первый в мире котел башенного типа для энергоблока ССКП мощностью 660 МВт (электростанция Tianji № 3 Gouwa) также были изготовлены этой фирмой [27].

Котлы ССКП компании НВС для энергоблоков мощностью более 1000 МВт установлены на ТЭС Guohua Taishan, Huaneng Yuhuan, Zhejiang Jiaxing и др. В декабре 2009 г. на ТЭС Huaneng Jinling пущен в работу первый энергоблок китайского производства с суперсверхкритическими параметрами пара мощностью 1030 МВт с котлом этой фирмы. В табл. 4 для сравнения приведены характеристики котлов, изготавливаемых этими тремя китайскими фирмами.

В 2012 г. в Китае была составлена дорожная карта дальнейшего развития технологии ССКП. Так как лидерство в производстве ключевых высокотемпературных материалов (сплавов на основе никеля) для установок с перегревом пара до 700°C принадлежит Японии и странам Европы, цель проекта состояла в том, чтобы в полной мере использовать существующие материалы, а для повышения эффективности таких установок применять энергоблоки с двойным промежуточным перегревом пара и энергоблоки мощностью более 1200 МВт. Успешная демонстрация первого энергоблока ССКП с двойным промежуточным перегревом пара мощностью 1000 МВт состоялась на электростанции Guodian Taizhou в 2015 г. Конструкция котла башенного типа для этой электростанции показана на рис. 15.

Специфика котла с двойным перегревом заключается в расположении подогревателей вторичного и третичного перегрева пара таким образом, чтобы обеспечивалась его номинальная температура. В этом котле поверхности вторичного и третичного перегрева расположены параллельно в верхней части топки. Для регулирования температуры пара промежуточного перегрева применены конструкция конвективной шахты по принципу “расщепленного хвоста” и горелки с возможностью изменения угла их наклона.

Далее приведены температуры сред, °С, по трактам котла в номинальном режиме его работы:

Вход воды в экономайзер	314.0
Выход воды из экономайзера	349.0
Выход первичного пара:	
из низкотемпературного перегревателя	524.6
из высокотемпературного перегревателя	605.0
Вход вторичного пара	
в низкотемпературный подогреватель	429.2
Выход вторичного пара:	
из низкотемпературного подогревателя	518.9
из высокотемпературного	
подогревателя	613.8
Вход третичного пара	
в низкотемпературный подогреватель	432.1
Выход третичного пара:	
из низкотемпературного подогревателя	523.2
из высокотемпературного подогревателя	613.3

Параметры пара на входе в турбину составляют 31 МПа, 600/610/610°C.

В табл. 5 для сравнения указаны параметры энергоблоков ССКП с одним и двумя промежуточными перегревами пара.

Следует отметить, что энергоблок ССКП мощностью 1000 МВт с двойным перегревом пара электростанции Guodian Taizhou имеет также самые низкие показатели по выбросам вредных веществ в атмосферу. Выбросы CO₂ сократились приблизительно на 5% по сравнению с выбросами аналогичного энергоблока с одним промежуточным перегревом, концентрации других загрязнителей в дымовых газах существенно меньше регламентируемых значений: твердые частицы – 2.3, SO₂ – 15, NO_x – 31 мг/м³.

В 2015 г. было запущено в эксплуатацию пять энергоблоков ССКП с двойным промежуточным перегревом (табл. 6).

Таблица 4. Характеристики котлов на каменном угле с температурой перегретого пара 605°C энергоблоков ССКП мощностью 1000 МВт, поставляемых фирмами Китая (по данным [6])

Характеристика, параметр	Фирма-поставщик		
	Dongfang Boiler Co. Ltd (DBC)	Harbin Boiler Co. Ltd (HBC)	Shanghai Boiler Works Ltd (SBWL)
Источник технологии	ВНК (MHPS)	МНН (MHPS)	Alstom-EUT (GE)
Способ регулирования температуры пара	Заслонка дымовых газов + + впрыск	Заслонка дымовых газов + + изменение угла наклона горелок + впрыск	Заслонка дымовых газов + + изменение угла наклона горелок + впрыск
Организация сжигания	Трехъярусное встречное расположение горелок на фронтальной и задней стенках топки	Двухъярусное расположение поворотных горелок с организацией тангенциального сжигания (два вихря)	Трехъярусное расположение поворотных горелок с организацией тангенциального сжигания
Размер топки, м	33.9734 × 15.5584 × 64.0	32.084 × 15.67 × 66/6	35.5 × 14.86 × 66.9
Объемное теплонепряжение топки, кВт/м ³	79.0	82.7	—
Теплонепряжение сечения топки, МВт/м ²	4.5	5.6	0
Экранирование топки	Комбинированная система: НРЧ в виде спирально-ленточной навивки труб с внутренним оребрением, панели ВРЧ из вертикальных гладких труб	Комбинированная система: панели ВРЧ из вертикальных труб с внутренним оребрением, панели ВРЧ из вертикальных гладких труб	Панели из вертикальных труб с внутренним оребрением*
Типичный пример реализации	Shandong Zouxian, провинция Шаньдун	Huaneng Yuhuan, провинция Чжэцзян	Waigaoqiao № 3, Шанхай
Расход пара, т/ч:			
перегретого	3033	2953	2953
вторичного	2470	2457	2446
Давление пара, МПа:			
перегретого	26.3	27.6	27.7
вторичного на входе в котел	4.99	6.0	4.92
вторичного на выходе из котла	4.79	5.8	4.77
Температура, °С:			
пара промежуточного перегрева (вход/выход)	356.3/603.0	359.0/603.0	375.0/603.0
питательной воды	302	296	297

* По данным [8] в настоящее время на котлах SBWL НРЧ выполняют в виде спирально-ленточной навивки труб.

Наибольший КПД 48.12% при параметрах пара 31 МПа, 600/620/620°C был достигнут на энергоблоке ССКП мощностью 1000 МВт, установленном на электростанции Huaneng Laiwu. Планируется ввод энергоблока Waigaoqiao 9 мощностью 1350 МВт на параметры пара 30 МПа, 600/620/610°C с ожидаемым КПД нетто 48.9%.

Завершены исследования по другому направлению повышения эффективности энергоблоков ССКП – увеличению мощности до 1200 МВт [28]. В провинции Цзянсу строится демонстрационный энергоблок ССКП с параметрами пара 28 МПа, 600/620°C, эффективность которого составит 46.6%. Еще два энергоблока мощностью 1240 МВт с па-

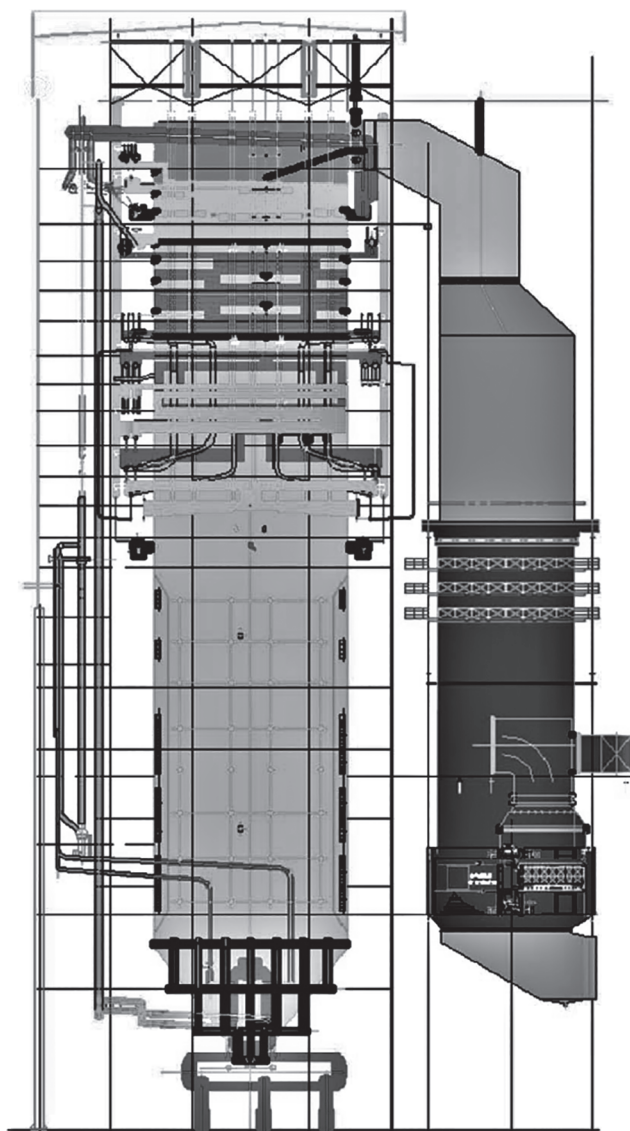


Рис. 15. Конструкция котла с двойным промежуточным перегревом [28]

параметрами пара 29 МПа, 600/620°C должны были быть введены в эксплуатацию на ТЭС Yangxi Power (провинция Гуандун) в 2019 г. Проектный КПД этих энергоблоков должен составить 49.44% [28].

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ ССКП В РОССИИ

Россия занимает второе место по запасам угля в мире после США. Ее доля в мировых запасах составляет около 15%, в добыче – 5.5%, обеспечивая ей позицию шестого крупнейшего производителя. В 2018 г. по объемам потребления угля наша страна находилась на четвертом месте в мире (с долей примерно 3%) и являлась третьим крупнейшим мировым экспортером, расширив свою долю в мире до 14.8% [29].

В России не планируется существенное сокращение угольной электрогенерации, более того, в рамках Технологической платформы “Экологически чистая тепловая энергетика высокой эффективности” намечены направления повышения ее эффективности, в том числе создание отечественного угольного энергоблока ССКП. Всероссийский теплотехнический институт (ОАО ВТИ) активно подключился к решению этой задачи. В 2005 г. была проведена работа по обоснованию и выбору мощности, параметров и технико-экономических показателей головного замещающего энергоблока ССКП для реконструкции первой очереди Рязанской ГРЭС. Разработан концептуальный проект угольного энергоблока мощностью 550 МВт на суперсверхкритические параметры пара (30 МПа, 600/600°C) для Рефтинской ГРЭС. В 2007–2008 гг. ОАО ВТИ, НПО ЦКТИ, ЦНИИТМаш совместно с ОАО “ЭМАльянс” и ОАО “Силовые машины” выполнили предпроектную проработку энергоблока мощностью 660 МВт на параметры пара 29.4 МПа, 600/620°C [30]. При разработке проекта были также рассмотрены отдельные конструктивные решения, учитывающие особенности сжигания конкретных российских углей. Установлено, что для котлов ССКП наиболее перспективны каменные угли марок Г и Д открытой добычи Кузнецкого бассейна, а также бурые угли Канско-Ачинского бассейна. Имеются большие запасы этих углей, их добыча расширяется.

Для пилотного проекта энергоблока 660 МВт с параметрами пара 29.4 МПа, 600/600°C (второй вариант – 29.4 МПа, 610/620°C) был выбран уголь марки ДГ Талдинского месторождения. Разрабо-

Таблица 5. Параметры энергоблоков на суперсверхкритическое давление мощностью 1000 МВт с одним и двумя промежуточными перегревами пара

Параметр	Перегрев пара	
	двойной	одинарный
Давление пара, МПа	3	25
Температура пара, °С	600/610/610	600/600
Удельный расход тепла на турбину, кДж/(кВт · ч)	7064.87	7350 (в среднем)
КПД котла, %	94.78	94.0
КПД выработки электроэнергии, %	47.82	45.58
Удельный расход условного топлива, г/(кВт · ч)	256.8	271.0

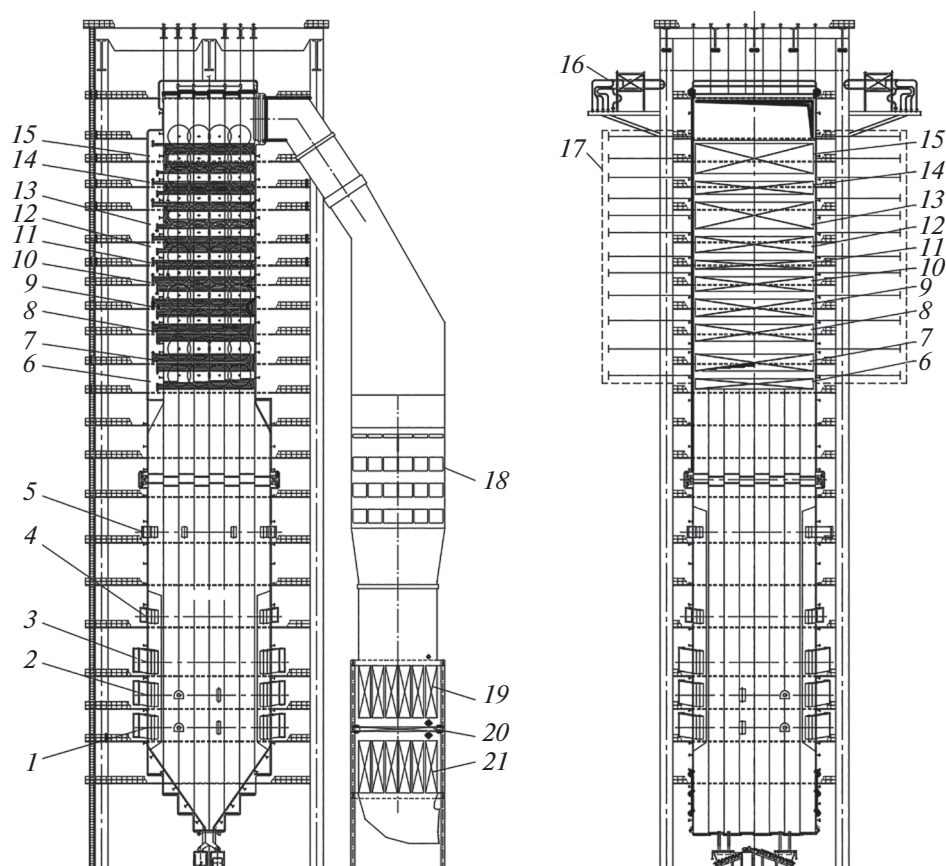


Рис. 16. Котел энергоблока ССКП мощностью 660 МВт.

1, 2, 3 – первый, второй и третий ярусы горелок; 4, 5 – первый и второй ярусы сопел третичного дутья; 6, 7, 8 – ширмовый пароперегреватель первой, третьей и второй ступени; 9 – ширмовый промежуточный пароперегреватель второй ступени; 10, 13 – конвективный промежуточный пароперегреватель третьей и первой ступени; 11, 12 – конвективный пароперегреватель пятой и четвертой ступени; 14, 15 – экономайзер второй и первой ступени; 16 – паро-паровой теплообменник; 17 – зона размещения обдувочных аппаратов; 18 – реактор СКВ; 19, 21 – ТПВ второй и первой ступени; 20 – газовойодяной теплообменник

таный котел для энергоблока 660 МВт имеет башенную компоновку (рис. 16), однократный промежуточный перегрев пара. Котел рассчитан на пуск и работу с пониженными нагрузками на скользящем давлении во всем тракте [31].

Топка котла тангенциальная, с угловым трехъярусным расположением горелок и трехступенчатым сжиганием, с твердым шлакоудалением. В каждой горелке предусматриваются два канала ввода аэросмеси от двух мельниц, что позволяет обеспечить наибольшую равномерность распределения

тепловой нагрузки в объеме зоны активного горения при отключении мельницы. Подготовка угольной пыли осуществляется в среднеходных мельницах, оснащенных динамическим сепаратором.

Для снижения образования оксидов азота применены малотоксичные горелки с концентрической подачей части вторичного воздуха, трехступенчатое сжигание топлива с использованием тонкой пыли основного топлива для создания восстановительной зоны, рециркуляция дымовых газов в горелки. Ожидается, что перечислен-

Таблица 6. Электростанции Китая с энергоблоками ССКП давлением 31 МПа с двойным перегревом пара

Электростанция	Мощность, МВт	Температура пара, °С	Год пуска	КПД, %
Guodian Taizhou	2 × 1000	600/610/610	2015	47.82
Huaneng Anyuan	2 × 660	600/620/620	2015	46.86
Huaneng Laiwu	1000	600/620/620	2015	48.12

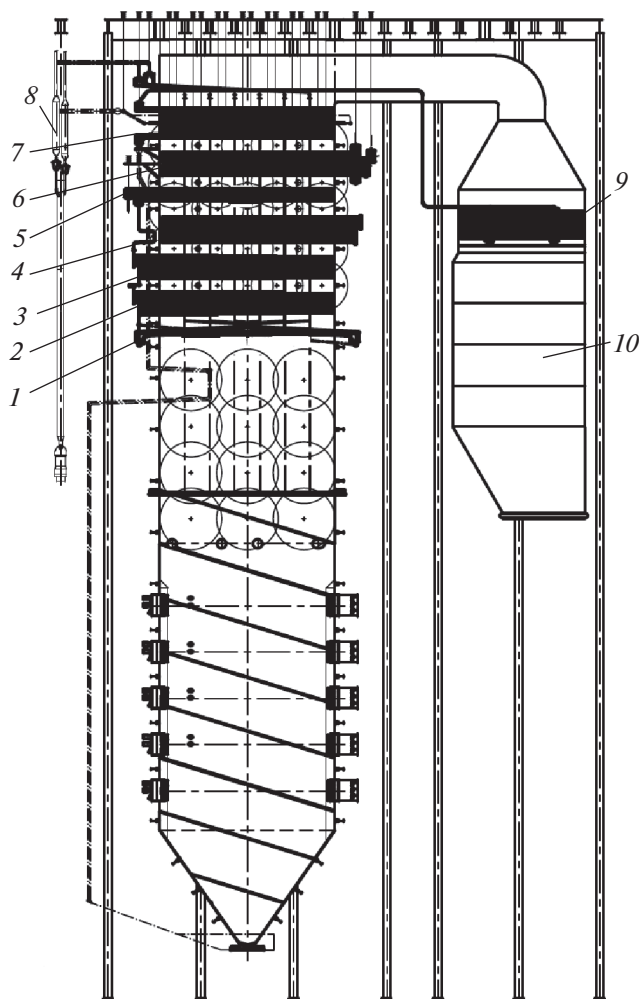


Рис. 17. Котел Пп-1850-30-615/615КТ ОАО “ТКЗ Красный котельщик”.

1 – подвесные трубы; 2, 3 – ширмовый пароперегреватель первой и второй ступени; 4 – выходная ступень промежуточного пароперегревателя; 5 – конвективный пароперегреватель; 6 – промежуточный пароперегреватель первой ступени; 7, 9 – водяной экономайзер второй и первой ступени; 8 – сепаратор пара; 10 – СКВ

ные мероприятия позволят получить содержание NO_x на выходе из топки не выше 400 мг/м^3 . Снижение концентрации NO_x до 200 мг/м^3 достигается установкой перед трубчатый воздухоподогревателем (ТВП) реактора СКВ.

На каждой из двух ниток пароводяного тракта котла размещены два пусковых сепаратора с верхним выходом пара и нижним отводом воды в сливные коллекторы, что при пусках обеспечит предотвращение заброса влаги в пароперегревательные поверхности нагрева, выполненные из высоколегированных марок стали, и тем самым исключит снижение надежности из-за теплосмен.

Кроме того, это даст возможность автоматизировать пусковые режимы при использовании показателя уровня воды в сливных коллекторах в качестве импульса для регулирования сброса воды.

Воздух нагревается в отдельно стоящем ТВП, в расщелку которого установлен газовой теплообменник, предназначенный для снижения температуры уходящих газов и повышения КПД котла и энергоблока в целом. По воде теплообменник включается в систему регенерации паровой турбины. Расчетный КПД брутто котла составляет 94.5%.

Пароперегреватели, коллекторы и паропроводы могут быть изготовлены из отечественных сталей: аустенитной хромоникелевой стали марки 10X16H16B2МБР (ЭП184), мартенситных хромистых сталей 10X9МФБ и 10X9B2МФБР (аналогичных зарубежным сталям соответственно Р91 и Р92, которые успешно используются для энергоблоков с температурой пара $600/620^\circ\text{C}$). Котел оборудуется усовершенствованными электрофильтрами и установкой мокрой известковой сероочистки.

Эскизный проект котла к энергоблоку 660 МВт на суперсверхкритические параметры пара (30 МПа, $615/615^\circ\text{C}$) для сжигания слабошлакующих кузнецких каменных углей марок Г и Д Новоказанского месторождения разработан в ОАО “ТКЗ Красный котельщик” (рис. 17) [32]. КПД брутто котла равен 94.2%. Принята башенная компоновка с опускным газоходом, где размещены первая ступень экономайзера и установка СКВ. Тангенциальная топка оборудована пятью ярусами горелок, расположенных по ее углам. Для сокращения выбросов оксидов азота до 200 мг/м^3 предусмотрены двухступенчатая схема сжигания и установка СКВ.

Экраны топки и конвективного газохода выполнены одноходовыми. В НРЧ используется спиральная навивка, верхняя радиационная часть и экраны конвективного газохода состоят из вертикальных панелей. Регулирование температуры пара промежуточного перегрева производится с помощью регулирующей ступени и дополнительно путем переключения ярусов горелок. Поверхности нагрева, за исключением выходных ступеней пароперегревателей, изготовлены из отечественных сталей. Система пылеприготовления включает в себя пять среднеходных мельниц. Сушка топлива осуществляется горячим воздухом, предусмотрено прямое сжигание угольной пыли.

АО “ЗиО” представило для энергоблока 660 МВт свой проект котла на суперсверхкритические параметры пара (30 МПа, $600/600^\circ\text{C}$), работающего на экибастузском угле с расчетным КПД брутто 93.65% (рис. 18) [33]. Котел имеет башенную компоновку, топка – прямоугольное сечение размерами в плане $14.214 \times 20.194 \text{ м}$. Экраны поделены на НРЧ и ВРЧ, продолжением последней являются экраны ограждения конвективного газохода.

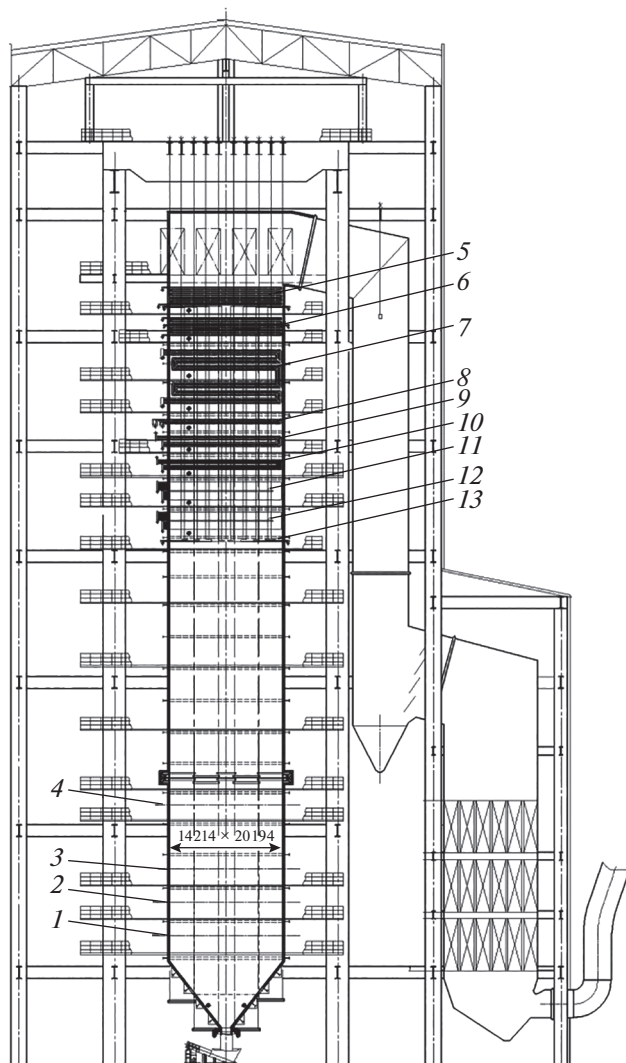


Рис. 18. Котел АО “ЗиО” для энергоблока 660 МВт на экибастузском угле.

1, 2, 3 – горелки первого, второго и третьего яруса; 4 – сопла третичного дутья; 5, 6 – экономайзер первой и второй ступени; 7, 9 – конвективный промежуточный пароперегреватель первой и второй ступени; 8, 10 – конвективный пароперегреватель третьей и четвертой ступени; 11, 12 – ширмовый пароперегреватель второй и первой ступени; 13 – подвесные трубы

Для обеспечения надежности работы труб ВРЧ выполнена в два хода, ВРЧ1 имеет байпас, расход пара через который составляет 58,4%. Лопаточно-лопаточные горелки со сдвоенным каналом вторичного воздуха расположены встречно в три яруса. Применение стадийно-ступенчатого способа сжигания с подачей до 20% воздуха через сопла третичного дутья обеспечивает концентрацию NO_x 640–685 мг/м³, а при установке СКВ – менее 350 мг/м³.

Для регулирования температуры пара промежуточного перегрева используется паро-паровой

теплообменник. Все поверхности пароперегревателей изготовлены из отечественных сталей. Нагрев воздуха производится в отдельно стоящем трубчатом воздухоподогревателе. Для очистки дымовых газов от золы устанавливается комбинированный аппарат, состоящий из электрофильтра и рукавного фильтра. Предусматривается сероочистка по мокросухому способу.

Для сжигания бурых шлакующих углей специалисты ЗиО-КОТЭС и АО “ЗиО” проработали профиль котла Т-образной компоновки с кольцевой топкой применительно к энергоблоку 660 МВт на параметры пара 27 МПа, 610/610°С [34]. Принципиальная особенность конструкции котла – кольцевая топка, представляющая собой восьмигранную призматическую камеру, внутри которой соосно по всей высоте установлена полая восьмигранная экранированная вставка.

ВЫВОДЫ

1. Развитию угольной генерации способствовали низкая стоимость угля как энергетического топлива, создание новых рабочих мест для населения в угледобывающих регионах и повышение уровня энергобезопасности благодаря хорошей обеспеченности запасами угля и возможности его хранения.

2. Ввод в эксплуатацию угольных ТЭС в последние десятилетия продолжился в рамках паросиловых технологий благодаря увеличению параметров пара на входе в турбину для повышения эффективности выработки электроэнергии и сокращения выбросов вредных веществ в атмосферу.

3. Рост объемов угольной генерации ожидается в Китае, Индии, России, Южной Корее, Малайзии, Индонезии и Вьетнаме. Сокращение количества угольных энергоблоков с полной их ликвидацией к 2030 г. намечено в США, Японии и некоторых европейских странах.

4. Основными поставщиками котельного оборудования энергоблоков ССКП Европы, Японии и Китая разработаны профили котлов, технологии сжигания углей различных типов, системы очистки дымовых газов от вредных веществ, новые жаропрочные материалы.

5. Для развития угольной энергетики в России необходимы стимулирующая техническая политика и экономические условия для реализации: цены на уголь, энергетическое оборудование, условия кредитования, строительства и обслуживания. Необходимо разработать программу технического перевооружения эксплуатируемых угольных энергоблоков с конечным выходом на современные экономические и экологические показатели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Japan** Coal Phase-Out: The Path to Phase-Out by 2030. Режим доступа: https://www.kiconet.org/wp/wp-content/uploads/2018/11/Report_Japan-Coal-Phase-Out_EG.pdf
2. **Mapped:** The world's coal power plants. Режим доступа: <https://www.carbonbrief.org/mapped-worlds-coal-power-plants>
3. **СТО 70238424.27.100.008-2008.** Стандарт организации НП "ИНВЭЛ". Блочные установки. Условия поставки. Нормы и требования. М.: НП ИНВЭЛ, 2008.
4. **Makino K.** Clean coal technology – for the future utilization // Clean Coal Technology and Sustainable Development: Proc. of the 8th Intern. Symposium on Coal Combustion. Springer Science+Business Media Singapore and Tsinghua University Press, 2016. P. 3–8.
5. **Xiaomei Tan.** Supercritical and ultrasupercritical coal-fired power generation. Режим доступа: <https://www.bpasstudies.org/bpastudies/article/view/170/318>
6. **Туров А.Н.** Развитие электроэнергетики в Китае // Энергохозяйство за рубежом. 2016. № 3 (286). С. 7–14.
7. **Mitsubishi Hitachi power systems Ltd.** Boiler business and technology development // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2015. V. 52. № 2. P. 55–63.
8. **Sato Y. Lünen.** Art 813 MW coal-fired USC boiler with high efficiency and flexibility // Power-Gen Europe 2014. Cologne, Germany, 3–5 June 2014.
9. **Welford G.** Vertical tubes improve supercritical systems. Режим доступа: <https://www.modernpowersystems.com/features/featurevertical-tubes-improve-supercritical-systems>
10. **Shimogori Y.** Ultra super critical pressure coal fired boiler-state of the art technology applications. Режим доступа: <https://pdfslide.net/documents/super-critical-details.html>
11. **Design** technology for supercritical sliding pressure operation vertical water wall boilers / K. Yamamoto, H. Saganuma, K. Domoto, Y. Yamasaki, Y. Kanemaki, H. Nakaharai // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2013. V. 50. № 3. P. 59–68.
12. **Majewski K.** Concept of a measurement and test station to determine linear pressure drop and the heat transfer coefficient of internally ribbed tubes // J. Power Technologies. 2013. V. 93. № 5. P. 340–346.
13. **Richardson M., Kidera Y., Shimogori Y.** Supercritical boiler technology matures. Режим доступа: https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Supercritical_Boiler_Technology_Matures.pdf
14. **Acton J., Suzuki Y., Shimogori Y.** 495-MW capacity genesee phase 3 project: the first supercritical pressure coal-fired boiler in Canada. Режим доступа: <https://studylib.net/doc/18714214/495-mw-capacity-genesee-phase-3-project>
15. **Development** of ultra-low NO_x coal firing M-PM burner and successfully operational results / K. Matsumoto, Jun Kasai, T. Saeki, Y. Takei, T. Suto // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2015. V. 52. № 2. P. 72–77.
16. **Latest** low-NO_x combustion technology for pulverized-coal-fired boilers / K. Ochi, K. Kiyama, H. Yoshizako, H. Okazaki, M. Taniguchi // Hitachi Review. 2009. V. 58. № 5. P. 187–193.
17. **Advanced** development of pulverized coal firing technologies / M. Tamura, Sh. Watanabe, E. Oono, R. Itokazu, T. Kozaki // IHI Engi. Rev. 2011. V. 44. № 2. P. 1–6.
18. **Hitachi** latest technologies for coal firing power plant / Y. Fukuda, K. Kiyama, Y. Nagai, T. Nakamoto, T. Yano. Режим доступа: http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/meetings/EG1/LATEST_TECH.pdf
19. **Thomas W.** Hitachinaka thermal power station unit 2, Tokai, Ibaraki Prefecture, Japan. Режим доступа: <https://www.powermag.com/hitachinaka-thermal-power-station-unit-2-tokai-ibaraki-prefecture-japan/>
20. **Саламов А.А.** Котел сверхкритического давления для мощного пылеугольного энергоблока // Энергетика за рубежом. 2013. № 1. С. 25–29.
21. **Тумановский А.Г., Котлер В.Р., Вихрев Ю.В.** Блок 1000 МВт на высоковлажном буром угле для ТЭС "Нидераусем" // Энергетика за рубежом. 2003. № 11. С. 69–74.
22. **RDК 8's** three little words: Efficient, reliable and flexible. May 2010. Режим доступа: <https://www.powerengineeringint.com/world-regions/europe/rdk-8s-three-little-words-efficient-reliable-and-flexible/>
23. **Alstom** to provide two 900 MW units for the largest coal-fired power plant in Poland. Режим доступа: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2014/1/alstom-to-provide-two-900-mw-units-for-the-largest-coal-fired-power-plant-in-poland>
24. **Coal** power: a surprisingly large number of projects in the pipeline modern power system. Oct. 2018. Режим доступа: <https://www.modernpowersystems.com/features/featurecoal-power-a-surprisingly-large-number-of-projects-in-the-pipeline-6905457/>
25. **Minchener A.** Developments in China's coal-fired power sector. Jan. 2010. ISBN 978-92-9029-483-2. Режим доступа: <https://ru.scribd.com/document/406689966/Developments-in-China-s-Coal-Fired-Power-Sector>
26. <http://en.mhps-dongfangboiler.com/ljglstrm.html>
27. <http://shanghaielectric-smec.com/1-1-4-boilers/>
28. **China's** R&D of advanced ultra-supercritical coal-fired power generation for addressing climate change / Haojie Fan, Zhongxiao Zhang, Jiancong Dong, Wei Xu // Therm. Sci. Eng. Prog. 2018. № 5. P. 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.01.007>
29. **ТЭК** России—2019: Статистический сб. Режим доступа: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/ТЕК_annual/ТЕК.2019.pdf
30. **Разработка** пылеугольного энергоблока на сверхкритические параметры пара мощностью 660 МВт / А.Г. Тумановский, М.Ю. Алтухов, А.Л. Шварц, Г.Д. Авруцкий, Э.Х. Вербовецкий, Е.А. Туголуков, А.А. Смышляев, Л.А. Хоменок, А.Н. Скоробогатых // Электрические станции. 2010. № 1. С. 18–27.
31. **Пылеугольный** котел для энергоблока нового поколения на сверхкритические параметры пара / А.Г. Тумановский, А.Л. Шварц, Е.А. Туголуков,

- А.А. Смышляев, Э.Х. Вербовецкий, О.В. Несиоловский, Н.В. Петрова // Теплоэнергетика. 2009. № 6. С. 2–9.
32. **Технические** решения по котлу энергоблока 660 МВт на суперсверхкритические параметры пара / В.В. Иваненко, А.Н. Безгрешнов, Д.Л. Михалев, А.Н. Озеров, П.Н. Федотов, К.Г. Жуков, С.Н. Зеленский // Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла: II Междунар. науч.-техн. конф. 28–29 октября 2014 г. М.: ВТИ, 2014. С. 61–65.
33. **Паровые** котлы на суперсверхкритические параметры / К.С. Крылова, М.Г. Брыксин, М.А. Изюмов, Р.Б. Буренкова, С.А. Самохин // Современные технологии в энергетике – основа повышения надежности, эффективности и безопасности оборудования ТЭС: Спец. науч.-практ. конф. молодых специалистов. 7, 8 июня 2012 г. М.: ВТИ, 2012. С. 253–259.
34. **Котел** с кольцевой топкой для энергоблока 660 МВт на суперсверхкритические параметры при сжигании бурых шлакующих углей / Ф.А. Серант, И.Ю. Белоруцкий, Ю.А. Ершов, В.В. Гордеев, О.И. Ставская, Т.В. Кацель // Теплоэнергетика. 2013. № 12. С. 16–22.

Overview of Foreign Boiler Designs for Ultra Supercritical (USC) Boilers and Prospects for Development of USC Power Units in Russia

E. V. Somova^{a,*}, A. N. Tugov^a, and A. G. Tumanovskii^a

^aAll-Russia Thermal Engineering Institute (VTI), Moscow, 115280 Russia

*e-mail: evsomova@vti.ru

Abstract—In the coming years, global electricity generation will largely be carried out using coal as fuel (coal generation). Certain European countries, the United States, Canada, and Japan are trying to cut down the number of coal-fired power units with their complete disposal by 2030. At the same time, the countries of the Asia-Pacific region, mainly China and India, are extensively developing a technology for the coal generation of steam at ultra supercritical (USC) conditions, which improves the efficiency of electricity generation and reduces harmful atmospheric emissions. The world power industry presently uses steam conditions of approximately 30 MPa and 610/620°C. The efficiency is as high as 47%. An overview is presented of the designs of USC coal-fired power boilers from the largest foreign manufacturers of boiler equipment in Europe (Alstom), Japan (Mitsubishi Hitachi Power Systems and Ishikawajima-Harima Heavy Industries), and China (Harbin Boiler Co., Ltd., Dongfang Boiler Co., Ltd., and Shanghai Boiler Works, Ltd.). Russia ranks tenth in the world as to the total coal-fired power generation. The percentage of coal-fired generation in Russia was approximately 13.5% in 2016. The development of engineering solutions for the USC power unit was undertaken in Russia at the beginning of the 21st century. Boiler equipment manufacturers worked out projects of boilers designed to operate on various coal types for a 660-MW power unit. The construction of the USC power unit prototype requires joint efforts of the government, power engineers, metallurgists, research organizations, and equipment manufacturers.

Keywords: coal generation, pulverized coal-fired power unit, ultrasupercritical steam conditions, boiler, burner unit, steam reheat, water-wall cooling, harmful emissions