

УДК 621.311

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭКОЛОГИЧНЫЕ ЭНЕРГОБЛОКИ ТЭС НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

*Елисеев Ю.В. <sup>\*</sup>, Ноздренко Г.В. <sup>\*\*</sup>, Шепель В.С. <sup>\*</sup>*

*<sup>\*</sup>ЗАО «Е4-СибКОТЭС»; <sup>\*\*</sup> НГТУ*

Сегодня важнейшей задачей электроэнергетики России является повышение конкурентоспособности и привлекательности угольной генерации. Движущей силой для реструктуризации генерирующих мощностей страны должно стать изменение соотношения стоимостей газа и твердого топлива наравне с созданием и отработкой чистых угольных технологий, обеспечивающих экологичность использования топлива, а также эффективность выработки электроэнергии [1, 2, 3, 4]. Отсутствие у отечественной энергетики отработанных технологий систем глубокой очистки дымовых газов от оксидов серы и азота, а также низкая технологическая готовность к созданию материалов, способных надежно работать в условиях высоких температур и давлений, определяют высокую капиталоемкость строительства собственных конкурентоспособных угольных станций нового поколения и потому требуют государственной поддержки.

Отечественная энергетика обладает большими резервами для повышения эффективности производства электроэнергии. Это в первую очередь касается структуры генерирующих мощностей, при которой около половины объема электроэнергии в стране вырабатывается на природном газе с неоправданно низким КПД для современного уровня развития технологий. С другой стороны, имеется значительный потенциал для совершенствования оборудования и схем паросиловых энергоблоков традиционного технологического профиля. Реализация этого потенциала особенно актуальна сегодня, когда существует острая необходимость обновления парка генерирующих мощностей с применением последних достижений мирового энергомашиностроения.

Следует подчеркнуть, что принципиальная важность данной задачи для отечественной энергетики заключается в том, что имеется уникальная возможность внедрения и отработки новых решений и технологий при масштабном строительстве новых мощностей. За счет этого может быть достигнута глубокая унификация проектов и основных узлов оборудования нового поколения, позволяющая сократить время и затраты на разработку проектов и строительство энергообъектов. Полученный опыт и освоение новых технологий позволит российским компаниям сократить отставание от лидеров мирового энергомашиностроения.

Неотъемлемым требованием, предъявляемым к пылеугольным энергоблокам нового поколения, является обеспечение минимально возможной экологической нагрузки на окружающую среду, в частности на атмосферу [5, 6]. Это обусловлено в немалой степени тем, что все существующие технологии глубокой очистки дымовых газов требуют больших капиталовложений и поэтому целесообразны для установки в основном на котлах большой мощности. Этот

факт получил отражение и в нормативах на выбросы, установленных как в России [7], так и в развитых странах [8].

Необходимость формирования экологически чистой угольной энергетики определяет новую концепцию конденсационных пылеугольных энергоблоков, повышение эффективности которых достигается как за счет совершенствования технологического процесса, так и за счет перехода на повышенные параметры пара, а снижение выбросов загрязняющих веществ до предельно низких значений обеспечивается установками глубокой очистки дымовых газов.

Среди наиболее перспективных мероприятий для повышения эффективности паросиловых энергоблоков следующие: совершенствование проточной части и уплотнений паровых турбин, снижение температуры уходящих газов, снижение скоростей пароводяного потока и гидравлического сопротивления котлов при вертикальной компоновке экранных труб с внутренним оребрением, минимизация присосов воздуха по газовому тракту котла, применение паровой сушки угля с регенерацией затраченного тепла, расположение установок сероочистки внутри градирен и отвод через них уходящих газов в атмосферу и другие. Все эти методы были уже внедрены на наиболее экономичных ТЭС мира и доказали эффективность своего применения.

В настоящей работе рассматриваются перспективы создания экологичных блоков повышенной эффективности на суперкритические параметры (СКП) пара для условий отечественной энергетики. Целью работы является анализ результатов многовариантных вычислительных экспериментов и разработка на этой основе рекомендаций по выбору рациональных схем, расходно-термодинамических и конструктивно-компоновочных параметров энергооборудования и оборудования систем очистки дымовых газов применительно к характерным мощностям отечественных энергоблоков, использующих кузнецкие и канско-ачинские угли.

Расчеты выполняются для энергоблоков мощностью 330, 500, 660, 800 МВт с суперкритическими параметрами 28,4 МПа/600/600 °С, температурой питательной воды 305,5°С, давлением в конденсаторе 3,5 кПа. Модель энергоблока составлена на основе разработок [5, 9]. Профиль системы регенерации по схеме Виолена: 5ПНД+Деаэратор+4ПВД. На рис. 1 показана принципиальная схема энергоблока с системами серо- (WFGD – Wet Flue Gas Desulfurization) и азотоочистки (SCR – Selective Catalytic Reduction).

В качестве расчетного принят уголь кузнецкого бассейна марок Г и Д. Максимальная допустимая температура на выходе из топки 1150°С. Параметры энергоблока и расчетные характеристики топлива представлены в табл. 1.

Котлоагрегат выполняется однокорпусным с твердым шлакоудалением, уравновешенной тягой, башенной компоновкой поверхностей нагрева и однократным промежуточным перегревом.

Режимно-технологическими мероприятиями достигается концентрация оксидов азота на выходе из топки на уровне 600 мг/нм<sup>3</sup>. По неэкранированному опускному газоходу газы подаются в реакторы SCR, где концентрация оксидов азота снижается до 150 мг/нм<sup>3</sup>. Далее дымовые газы проходят трубчатый воздухоподогреватель, электрофильтры и направляются на установку сероочистки,

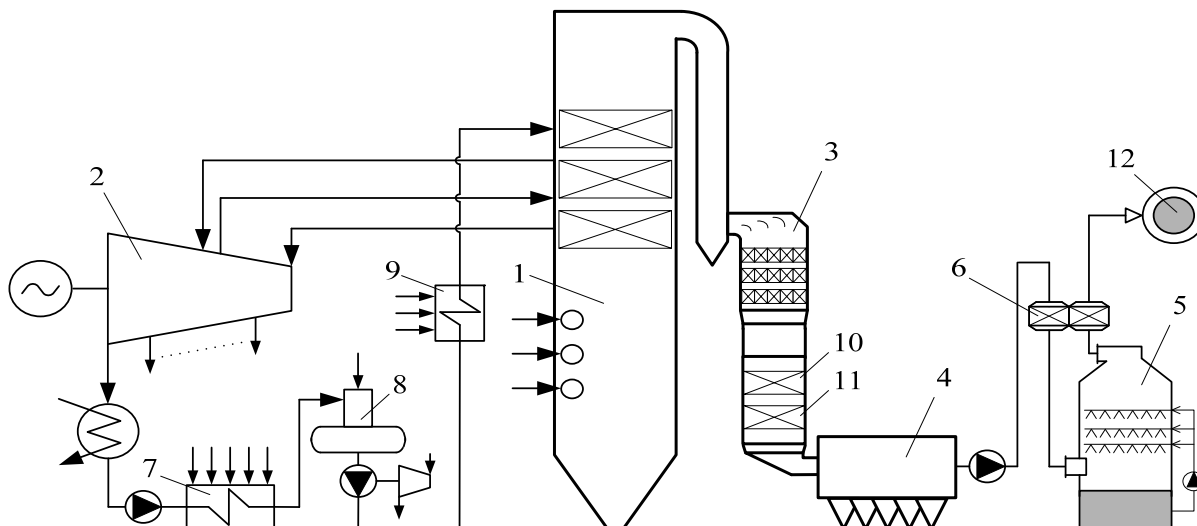


Рис. 1. Принципиальная схема энергоблока сверхкритических параметров с системами серо- и азотоочистки:

1 – котел; 2 – многоцилиндровая турбина; 3 – реактор СКВ; 4 – электрофильтр; 5 – абсорбер системы сероочистки; 6 – газогазовый теплообменник (ГГТО); 7 – группа подогревателей низкого давления; 8 – деаэрактор; 9 – группа подогревателей высокого давления; 10 – ТВП-2; 11 – ТВП-1; 12 – выхлоп в атмосферу.

где концентрация оксидов серы снижается до уровня  $200 \text{ мг/нм}^3$ . Очищенные от оксидов серы газы подогреваются в газогазовый теплообменник (ГГТО) и выбрасываются в атмосферу.

Традиционной схемой при использовании мокрой известняковой системы очистки предусматривается отвод дымовых газов через дымовую трубу. Для исключения активных коррозионных процессов, а также для обеспечения необходимой тяги в этом случае необходим подогрев очищенных газов выше температуры точки росы, до которой они охлаждаются, промываясь суспензией известняка. Для этого используется тепло неочищенного потока дымовых газов (см. рис. 1), что соответственно исключает возможность утилизации этого тепла в цикле производства электроэнергии. По этой причине базовая расчетная модель блока СКП не включает турбинный экономайзер (ТуЭ).

Таблица 1

**Основные характеристики энергоблока**

Наименование	Размерность	Величина
Параметры острого пара:		
• давление	МПа	28,4
• температура	°С	600
Параметры пара промежуточного перегрева:		
• давление	МПа	4,8
• температура	°С	600
Давление в конденсаторе	кПа	3,5
Расчетный уголь		
Состав рабочей массы		
• влажность, $W^r$	%	10
• зольность, $A^r$	%	18
• углерод, $C^r$	%	58,2
• сера, $S^r$	%	0,4
• водород, $H^r$	%	4,0
• азот, $N^r$	%	1,8
• кислород, $O^r$	%	7,6
Нижшая теплота сгорания, $Q_i^r$	ккал/кг	5408

Наиболее показательным является сопоставление технико-экономических характеристик перспективных блоков с характеристиками энергоблоков на стандартные сверхкритические параметры (СКД) 24 МПа/540/540°С. Сравнение основных расчетных показателей выполнено для трех вариантов энергоблока 660 МВт: с системами New Integrated Desulphurization (NID) и Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR), обеспечивающими требования по выбросам РФ [7], – блоки **СКД-660** и **СКП(1)-660**, а также энергоблок с системами глубокой очистки WFGD и SCR – **СКП(2)-660** (табл. 2). Из этих данных видно, что при одинаковой вырабатываемой мощности энергоблок СКП(2)-660 отличается лучшими экологическими показателями не только за счет использования систем очистки дымовых газов, но и вследствие уменьшения нагрузки на системы охлаждения технической воды, а также снижения расхода натурального топлива.

Указанный экологический эффект отражает то обстоятельство, что повышение эффективности работы энергоблока, очевидно, снижает удельные выбросы токсичных и парниковых газов (как и в целом техногенное воздействие на окружающую среду) на 1 кВт·ч выработанной энергии, за счет чего соответственно снижается удельная стоимость систем очистки на 1 кВт установленной мощности.

Однако используемые в блоке СКП(2)-660 системы очистки весьма капиталоемки и приводят к удорожанию стоимости 1 кВт установленной мощности на 9% абс. (по сравнению с удельными капиталовложениями для блока СКП(1)-660). Учитывая сравнительно мягкие нормативы по выбросам в РФ, применение данных систем очистки с экономической точки зрения представляется нецелесообразным и может быть оправданно только в случае ужесточения нормативов или при строительстве энергоблока в экологически напряженных районах с условием замещения менее экологичного оборудования.

Кроме того, использование систем WFGD и SCR приводит к увеличению собственных нужд энергоблока, что также негативно сказывается на его интегральных технико-экономических характеристиках. В то же время, сравнивая показатели блоков СКД-660 и СКП(1)-660, использующих одинаковые системы

Таблица 2

**Технико-экономические показатели для энергоблоков СКД и СКП**

Наименование	Единицы измерения	Блок СКД-660	Блок СКП(1)-660	Блок СКП(2)-660
Мощность энергоблока	МВт	660,1	660,2	660,2
Расчетный КПД брутто энергоблока	%	39,20	43,76	43,40
Расход электроэнергии на собственные нужды	МВт	33,2	30,1	35,2
Расход натурального топлива на котел	т/ч	257,7	229	229
Удельный расход пара на турбину	кг/(кВт·ч)	3,12	2,78	2,78
Расход пара в конденсатор	т/ч	1163	958	958
Концентрация оксидов серы до/после системы сероочистки	мг/нм <sup>3</sup>	985/500	985/500	985/200
Концентрация оксидов азота до/после системы азотоочистки	мг/нм <sup>3</sup>	600/350	600/350	600/150
Удельная стоимость энергоблока	тыс. руб/кВт	52,2	53,1	58,0

очистки, видно, что повышение КПД приводит к снижению коэффициента собственных нужд блока. Другими словами повышение эффективности оборудования при сохранении величины выработки мощности снижает расходы основных материальных потоков в схеме энергоблока (топливо, воздух, дымовые газы, пар/вода рабочего цикла, вода системы охлаждения, всевозможные реагенты и т.п.), что уменьшает требуемую потребляемую мощность для привода вспомогательных агрегатов, транспортирующих эти потоки.

Удельные капиталовложения в системы WFGD и SCR суммарно достигают около 6,5 % от удельных капиталовложений в целом в энергоблок СКП(2). Удорожание энергоблока при переходе на суперкритические параметры пара (при использовании дорогостоящих материалов и усложнении исполнения наиболее ответственных узлов энергоблока) несколько компенсируется относительным снижением производительности основных и вспомогательных систем и агрегатов (котел, турбина, топливоподача, система охлаждения и т.п.). Таким образом, удорожание СКП-блоков оценивается в 2...3% от стоимости СКД-блока при прочих равных условиях.

Сравнение показателей экономической эффективности вариантов энергоблоков приводится в табл. 3. Расчеты экономических показателей производились при ставке дисконтирования 12% и в предположении использования собственником станции собственных средств для реализации проекта. При этом, учитывая разработанную программу развития электроэнергетики РФ [1], в соответствии с которой в период до 2020 г. планируется построить десятки угольных энергоблоков большой мощности по всей стране, реализация мощности в расчетах принята по договору о предоставлении мощности (ДПМ), при этом ДПМ-ставка за мощность рассчитывается согласно [10].

Из таблицы видно, что в рассматриваемых условиях проекты строительства блоков СКД-660 и СКП(1)-660 с установками очистки NID и SNCR сопоставимы по интегральным экономическим показателям. Обладая большими капиталовложениями, блок СКП(1)-660, однако, имеет меньшую себестоимость и больший чистый дисконтированный доход (ЧДД) и является привлекательным для реализации. В свою очередь энергоблок СКП(2)-660 окупается хуже остальных вариантов по причине высоких капиталовложений, но при этом этот вариант также возможен к реализации. Условия, в которых СКП(2)-660 выравнивается по экономическим показателям с другими, требуют увеличения доли экологических выплат в структуре себестоимости электроэнергии до 4,5%, что в тысячи раз больше существующих на сегодняшний день выплат.

Таблица 3

**Показатели экономической эффективности инвестиций**

Наименование	Единицы измерения	Блок СКД-660	Блок СКП(1)-660	Блок СКП(2)-660
Капиталовложения	млн. руб.	34 452	35 041	38 272
Себестоимость	руб./кВтч	0,95	0,93	1,01
<b>NPV (ЧДД)</b>	<b>млн. руб.</b>	<b>19 485</b>	<b>19 954</b>	<b>17 182</b>
PP (простой срок окуп.)	лет	7,02	7,03	7,31
<b>DPP (дисконт. срок окуп.)</b>	<b>лет</b>	<b>9,33</b>	<b>9,37</b>	<b>10,09</b>
IRR (ВНД)	%	20,4	20,4	18,7

Следует отметить, что при установке мокрой системы сероочистки WFGD появляется возможность для дальнейшего совершенствования схемы энергоблока и повышения его эффективности. Глубокая очистка дымовых газов от оксидов серы позволяет сбросить очищенные дымовые газы через градирню без их подогрева. Таким образом, снимаемое ранее в ГГТО тепло можно вернуть в цикл и/или использовать для подогрева воздуха с вытеснением отбора пара на калориферную установку. Потенциал повышения КПД такой схемы при работе энергоблока на кузнецком угле оценивается в 0,62% абс.

По результатам работы сделаны следующие выводы:

- КПД нетто энергоблоков СКП с системами очистки дымовых газов WFGD и SCR находится на уровне 43% при обеспечении предельно низких показателей по выбросам основных загрязняющих веществ в атмосферу;
- переход на суперкритические параметры пара снижает удельный расход пара на турбину в среднем на  $\Delta d_0 \approx 0,34$  кг/(кВт·ч);
- установка систем глубокой очистки WFGD и SCR снижает экономическую эффективность строительства энергоблока в целом и оправдана при ужесточении экологических норм;
- экономическая эффективность энергоблоков на суперкритические параметры пара сопоставима с энергоблоками на освоенные закритические параметры при прочих равных условиях;
- при работе на кузнецких углях достижимо повышение КПД на 0,62% за счет организации сброса дымовых газов через градирню;
- эффективным профилем новых высокоэкономичных энергоблоков является схема с многоцилиндровой турбиной, девятью отборами на систему регенерации, 2...3 реакторами SCR, одним абсорбером системы сероочистки и градирней с совмещенным каналом для отвода дымовых газов.

## Литература

1. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2020 года [Электронный ресурс] // Агентство по прогнозированию балансов в электроэнергетике: сайт. 2008. URL: <http://www.e-apbe.ru/scheme/gs.doc> (дата обращения: 25.09.2012).
2. Перспективы использования угля в электроэнергетике России // Электрические станции. – 2004. – № 12. – С. 2–14.
3. Ольховский, Г. Г. Перспективы тепловых электростанций / Г. Г. Ольховский // Электрические станции – 2010. – № 1. – С. 8–17.
4. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года // Прил. к обществ.-дел. журн. "Энергетическая политика". – М.: ГУ ИЭС, 2010. – 184 с.
5. Разработка пылеугольного энергоблока на суперкритические параметры пара мощностью 660 МВт / А. Г. Тумановский [и др.] // Электрические станции. – 2010. – № 1. – С. 18–27.
6. Пугач, Л. И. Энергетика и экология: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 504 с.

7. ГОСТ Р 50831–95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. – Введ. 01.01.97. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 23 с.
8. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: Информационный сборник / В. В. Абрамов и др.; под общей ред. В. Я. Путилова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 388 с.
9. О целесообразном уровне параметров для угольных энергоблоков следующего поколения: Доклад ВТИ для НТС РАО «ЕЭС России» / А. Г. Тумановский [и др.] – Москва, 2006.
10. Постановление Правительства РФ от 13 апреля 2010 г. № 238 "Об определении ценовых параметров торговли мощностью на оптовом рынке электрической энергии и мощности" // Собрание законодательства Российской Федерации. 2010. N 16. ст. 5397.