

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЭС СУПЕРКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ С СИСТЕМАМИ СЕРО- И АЗОТООЧИСТКИ

Г.В. НОЗДРЕНКО\*, Е.Е. РУССКИХ\*\*, В.С. ШЕПЕЛЬ\*\*

\* Новосибирский государственный технический университет

\*\* ЗАО «Е4-СибКОТЭС» г. Новосибирск

*В статье рассматриваются технико-экономические показатели перспективных энергоблоков тепловых электростанций суперкритических параметров с системами серо- и азотоочистки. Показано, что КПД таких энергоблоков находится на уровне 43 %. Приведены удельные капиталовложения и затраты в основное и вспомогательное оборудование, а также конструктивные параметры каталитических реакторов и абсорберов систем азото- и сероочистки.*

*Ключевые слова: суперкритические параметры, энергоблоки повышенной эффективности, КПД, сероочистка, азотоочистка, удельные капиталовложения.*

Огромные запасы угля в Сибири как базового стратегического топлива определяют формирование долговременной концепции развития энергетики страны (в первую очередь – Сибири) как угольной энергетики.

Для повышения конкурентоспособности угля как стратегического топлива необходимо повысить КПД и решить ряд проблем в области чистых угольных технологий. КПД нетто конденсационных энергоблоков, работающих на кузнецких и канско-ачинских углях, можно повысить до 43 %. Это достигается в результате уменьшения гидравлического сопротивления пароводяного тракта, повышения экономичности турбин и вспомогательного оборудования, повышения давления и температуры перегретого пара на выходе из котла до уровня 30 МПа/600/600 °С. На пылеугольных тепловых электростанциях (ТЭС) могут быть выполнены природоохранные мероприятия: внедрение систем серо- и азотоочистки, использование специальных горелок, ступенчатая подача воздуха и топлива для восстановления оксидов азота, подогрев угольной пыли перед сжиганием, подача пыли высокой концентрации, рециркуляция дымовых газов.

В данной статье рассматриваются технико-экономические показатели перспективных энергоблоков тепловых электростанций суперкритических параметров (СКП) с системами серо- и азотоочистки на основе технологий мокрой известняковой очистки и селективного каталитического восстановления (СКВ) соответственно. Мировой опыт снижения выбросов от электростанций показал, что данные установки являются одними из самых эффективных систем очистки дымовых газов от окислов серы и азота. Кроме того, на сегодняшний день эти системы обладают наибольшей технологической готовностью, о чем говорит большой накопленный опыт их проектирования и эксплуатации [1, 2].

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 серо- и азотоочистки применительно к характерным мощностям отечественных энергоблоков, использующих кузнецкие и канско-ачинские угли.

Расчеты выполнены с использованием лицензионного вычислительного комплекса ThermoFlow 18 [3]. Для заданных суперкритических начальных и конечных параметров пара, параметров промежуточного перегрева питательной воды рассчитывается тепловая схема. К функционально зависимым параметрам, в частности, относятся расходы рабочих сред, температурные напоры, передаваемые тепловые потоки, концентрации загрязняющих веществ, конструктивно-компоновочные параметры элементов оборудования, массо-стоимостные характеристики, всевозможные коэффициенты и т.д.

Зависимости между параметрами описаны уравнениями энергетического, расходного и гидравлического балансов. Система уравнений балансов в элементах оборудования устанавливает такое соотношение между термодинамическими и расходными параметрами, которое обеспечивает получение заданной стационарной нагрузки энергоблока с определенными конструктивными параметрами элементов и параметрами вида технологической (в том числе и тепловой) схемы энергоблока [4].

Для каждого расчетного варианта тепловой схемы энергоблока выполняются с совместной увязкой: тепловые и балансовые расчеты котла, турбины, регенеративных подогревателей, конденсатора, приводной турбины, основных трубопроводов, технических систем (топливоподачи, пылеприготовления, тягодутьевой, водоснабжения, золошлакоудаления, очистки и эвакуации дымовых газов); расчет мощности собственных нужд; определение расходов топлива.

В соответствии с содержанием расчетов полная система операторов, кроме вышеперечисленных, включает процедуры: определения термодинамических параметров воды и водяного пара, перебора вариантов параметров, изменения схемы энергоблока. Вычислительный комплекс обеспечивает достаточно точное описание реальных процессов как в рамках функционирующих частей, так и по информационным связям. Модели включают зависимости между входными и выходными расходно-термодинамическими параметрами, а также зависимости между этими параметрами и конструктивными характеристиками элементов, проверку параметров по всем видам ограничений, проверку допустимости расчетных значений (неотрицательность расходов, перепадов давлений, энергетических и материальных потоков и т.д.).

Уравнения для всего энергоблока и его внешних связей имеют следующий вид:

- энергобаланса

$$B \cdot Q_i^r = \sum_{k \in V(i)} (\eta \cdot M^x \cdot h)_{ki} - \sum_{j \in W(i)} (\eta \cdot M^y \cdot h)_{ij} = 0; \quad (1)$$

- расходного баланса

$$B + \sum_{k \in V(i)} M_{ki}^x - \sum_{j \in W(i)} M_{ji}^y. \quad (2)$$

Здесь  $B$  – расход топлива;  $M$ ,  $h$  – расход и энтальпия энергоносителя;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий соответствующие потери энергии.

Для каждого энергоносителя используются уравнения:

- изменения давления

$$\Delta P_{k,j} = \Delta P_{k,j}(X^K, X^S); \quad (3)$$

- изменения энтальпии

$$\Delta h_{k,j} = \Delta h_{k,j}(X^K, X^S); \quad (4)$$

- средней скорости потока

$$\Delta w_{k,j} = \Delta w_{k,j}(X^K, X^S); \quad (5)$$

- изменение температуры

$$\Delta t_{k,j} = \Delta t_{k,j}(X^K, X^S), \quad (6)$$

где  $X^K, X^S$  – конструктивно-компоновочные и расходно-термодинамические параметры соответственно.

Для каждой  $q$ -й поверхности нагрева, выполненной из  $m$ -й котельной стали, формируются зависимости:

- наибольшей температуры стенки

$$t_{qm} = t_{qm}(X^K, X^S); \quad (7)$$

- толщины стенки труб

$$\delta_{qm} = \delta_{qm}(X^K, X^S); \quad (8)$$

- расхода металла

$$G_{qm} = G_{qm}(X^K, X^S). \quad (9)$$

Параметры  $X^K, X^S$  могут изменяться лишь в пределах физически возможных и технически (технологически) осуществимых значений:

$$X^{K*} \leq X^K \leq X^{K**}; X^{S*} \leq X^S \leq X^{S**}, \quad (10)$$

где индексы \*, \*\* относятся к минимальным и максимальным допустимым значениям конструктивно-компоновочных параметров  $X^K$  и расходно-термодинамических параметров  $X^S$ .

Также накладываются ограничения, отражающие требования технологичности изготовления и эксплуатационной надежности:

$$w_{k,j}^* \leq w_{k,j}(X^K, X^S) \leq w_{k,j}^{**}; \quad (11)$$

$$\Delta t_{k,j}^* \leq \Delta t_{k,j}(X^K, X^S) \leq \Delta t_{k,j}^{**}; \quad (12)$$

$$t_{qm}^* \leq t_{qm}(X^K, X^S) \leq t_{qm}^{**}; \quad (13)$$

$$\delta_{qm}^* \leq \delta_{qm}(X^K, X^S) \leq \delta_{qm}^{**}. \quad (14)$$

Параметры  $X^K$  могут принимать лишь такие значения, которые находятся внутри или на границе допустимой области.

Капиталовложения включают расходы на создание, монтаж, доставку оборудования на место строительства, техническое освоение, а также затраты на главный корпус, подготовку территории, возведение временных зданий и сооружений, проектно-изыскательские работы, объекты подсобного назначения.

Каждая серия расчетов включает:

- многовариантные расчеты при заданных сочетаниях параметров энергоблока;
- вариации значений параметров в технически допустимых пределах.

Расчеты выполнены для энергоблоков 330, 500, 660, 800 МВт с суперкритическими параметрами 28,4 МПа/600/600 °С, температурой питательной воды 305,5 °С, давлением в конденсаторе 3,4 кПа. Модель энергоблока составлена на основе разработок [5, 6, 7]. На рис.1 показана принципиальная схема энергоблока с системами серо- и азотоочистки.

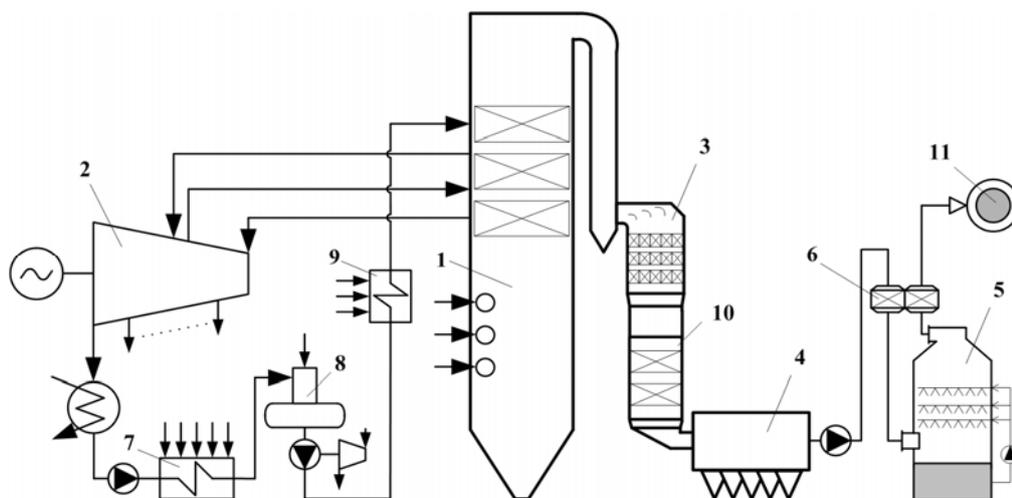


Рис. 1. Принципиальная схема энергоблока суперкритических параметров с системами серо- и азотоочистки: 1 – котел; 2 – многоцилиндровая турбина; 3 – реактор СКВ; 4 – электрофильтр; 5 – абсорбер системы сероочистки; 6 – газогазовый теплообменник (ГГТО); 7 – группа подогревателей низкого давления; 8 – деаэратор; 9 – группа подогревателей высокого давления; 10 – трубчатый воздухоподогреватель (ТВП); 11 – выхлоп в атмосферу

Котлы – башенной компоновки, работающие на кузнецких углях марок Г и Д, с содержанием серы, азота и зольности на рабочую массу соответственно:  $S^r = 0,4 \%$ ,  $N^r = 1,8 \%$ ,  $A^r = 18 \%$ ; низшая теплота сгорания на рабочую массу составляет  $Q_i^r = 5410$  ккал/кг. Параметры пара за котлом: 29,1 МПа/603 °С, 4,9 МПа/602 °С. Профиль системы регенерации по схеме Виолена: 5ПНД+Деаэратор+4ПВД.

Режимно-технологическими мероприятиями достигается уменьшение концентрации оксидов азота на выходе из топки до уровня 400 мг/нм<sup>3</sup>. После конвективного подъемного газохода дымовые газы подаются по незранированному опускному газоходу в реакторы СКВ, где концентрация оксидов азота снижается до 200 мг/нм<sup>3</sup>. Далее дымовые газы проходят трубчатый воздухоподогреватель, электрофильтры и направляются на установку

сероочистки, где концентрация оксидов серы снижется до уровня 200 мг/нм<sup>3</sup>. Очищенные от окислов серы газы подогреваются в ГГТО и выбрасываются в атмосферу.

В таблице приведены полученные параметры систем очистки дымовых газов. Из таблицы видно, что системы серо- и азотоочистки удовлетворяют современным требованиям к экологичности пылеугольных энергоблоков.

Таблица

Параметры систем очистки дымовых газов

Наименование	К-330	К-500	К-660	К-800
<i>Система селективно-каталитического восстановления (СКВ)</i>				
Расход дымовых газов через установку, млн. м <sup>3</sup> /ч	2,0	3,0	3,9	4,8
Количество реакторов СКВ на энергоблок	2	2	3	3
Высота реактора, м	11,8			
Ширина реактора, м	8,1	9,9	9,3	10,2
Температура дымовых газов перед установкой, °С	328			
Концентрация окислов азота на входе/на выходе, мг/м <sup>3</sup>	405/200	405/200	405/200	405/200
Расход аммиака, т/ч	0,074	0,111	0,146	0,178
Эффективность СКВ	0,508			
Потребление электроэнергии, кВт	45,6	68,2	89,7	109,3
<i>Сероочистка</i>				
Расход дымовых газов через установку, млн. м <sup>3</sup> /ч	1,37	2,05	2,70	3,29
Количество абсорберов на энергоблок	1			
Высота абсорбера, м	20,4	20,9	21,4	23,6
Диаметр абсорбера, м	11,7	14,3	16,4	18,2
Температура дымовых газов на входе /на выходе из установки и перед дымовой трубой, °С	109/50/100			
Концентрация окислов серы на входе /на выходе, мг/м <sup>3</sup>	974/200			
Потребление известняка, т/ч	1,24	1,85	2,44	2,97
Выход гипса, т/ч	2,34	3,51	4,61	5,62
Эффективность сероочистки	0,795			
Потребление электроэнергии, кВт	481	744	1004	1248

Следует отметить, что кроме увеличения размера собственных нужд установка сероочистки также оказывает и косвенное влияние на эффективность всей схемы. При использовании дымовой трубы система мокрого удаления окислов серы требует установки за собой теплообменника для подогрева дымовых газов выше температуры точки росы, до которой они охлаждаются в абсорбере, насыщаясь влагой из суспензии известняка. Наиболее эффективным и часто используемым способом повышения температуры газов является установка ГГТО на выходе из абсорбера, в котором тепло от неочищенного потока дымовых газов передается очищенному потоку. Использование ГГТО, однако, исключает возможность глубокого охлаждения дымовых газов с использованием, например, технологии турбинного экономайзера, что ограничивает потенциал утилизации этого тепла в цикле и, соответственно, повышения КПД котла и энергоблока в целом. Поэтому созданная расчетная модель не рассматривает вариант установки турбинного экономайзера.

Для мощностей энергоблоков 300...800 МВт количество реакторов СКВ – 2...3, абсорберов – 1 на энергоблок. На рис. 2 приведены удельные (на кВт

установленной мощности энергоблока) капиталовложения в энергоблок  $k_N$  и в системы серо- и азотоочистки – соответственно  $k_C^{СКП}$  и  $k_A^{СКП}$ . Из этих данных видно, что удельные капиталовложения в серо- и азотоочистку суммарно достигают 7 % от удельных капиталовложений в целом в энергоблок суперкритических параметров на кузнецком угле марок Г, Д. Вместе с тем можно отметить, что по сравнению с энергоблоками стандартных закритических параметров удельные капиталовложения в суперкритические энергоблоки с системами очистки примерно в 1,25 раза больше, при этом удорожание только от повышения начальных параметров пара составляет около 16...17,5 %.

Перегиб кривой  $k_A^{СКП}$  характеризует переход к трем реакторам СКВ для блока 660 МВт вместо двух для блоков 330 и 500 МВт, что определяется ростом объемных и массовых расходов дымовых газов при увеличении единичной мощности энергоблока. Переход к трем реакторам влечет за собой разделение основного потока дымовых газов на три параллельных потока, на каждом из которых устанавливаются отдельные ТВП, электрофильтр и дымосос. С ростом мощности энергоблока увеличение количества параллельных потоков наравне с усложнением профиля турбины (о чем говорится ниже) в конечном счете сказывается на характере кривых удельных капиталовложений  $k_i$ , изображенных на рис. 2 и 3.

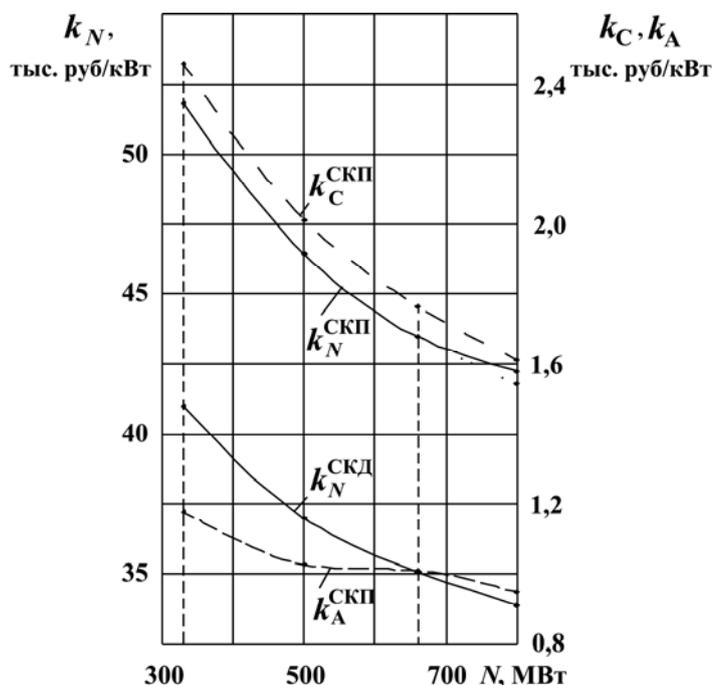


Рис. 2. Удельные капиталовложения в энергоблоки суперкритических параметров:  $k_N$  – в энергоблок в целом;  $k_C, k_A$  – в серо- и азотоочистку

На рис. 3 приведены удельные затраты в энергоблоки суперкритических параметров в сравнении с блоками сверхкритического давления (СКД). Из этих данных видно, что капиталовложения в основное оборудование блоков СКП  $k_O$  составляют около 40 % от капиталовложений в энергоблок в целом. Значительная

доля (около 28 %) приходится на дополнительные расходы  $k_D$  (на материалы, лицензии, подрядные работы, риски, неопределенности и др.) и затраты  $k_{CM}$  (около 17...18 %) на строительные-монтажные работы, сборку, транспортировку. Вспомогательное оборудование и системы контроля и управления энергоблока составляют остальные расходы.

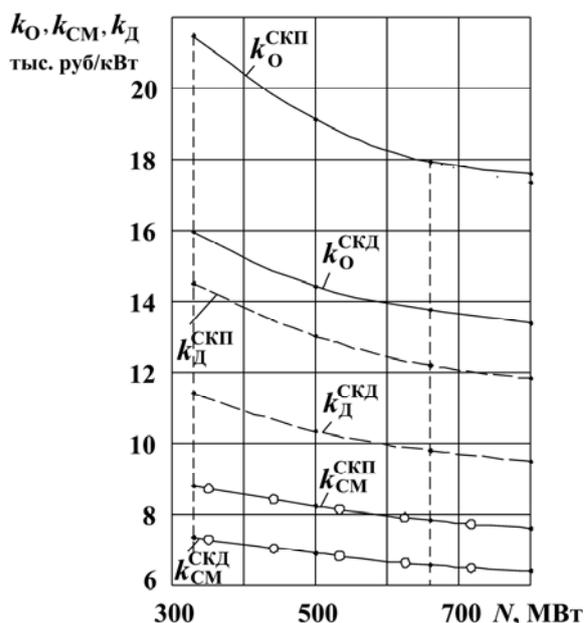


Рис. 3. Удельные затраты в энергоблоки суперкритических параметров:  $k_O$  – в основное оборудование;  $k_D$  – дополнительные расходы;  $k_{CM}$  – в строительные-монтажные работы

На рис. 4 показаны значения КПД энергоблоков СКП (линии 1 и 2 – КПД брутто и нетто) в сравнении с энергоблоками СКД (линии 3 и 4 – КПД брутто и нетто). Характерные изгибы кривых КПД определяются конструктивным исполнением ЧНД турбин. При достижении предельной длины лопатки последней ступени (ЛПС) растут потери с выходной скоростью, которые влияют на общий КПД энергоблока. Так, для блока на 330 МВт с одним двухпоточным цилиндром низкого давления (ЦНД) имеем наименьший КПД турбины из рассматриваемого ряда мощностей (КПД блока СКП ~42,6 %). Переход к большей мощности (500, 660 МВт) требует установки двух двухпоточных ЦНД, для которых потери с выходной скоростью меньше, а соответственно растет и КПД этих блоков (до ~43,2 % для блоков СКП). Дальнейшее увеличение мощности до 800 МВт требует для блоков традиционных параметров СКД установку третьего двухпоточного ЦНД, что опять же характеризуется ростом КПД блока, но одновременно и дополнительным ростом капитальных затрат в его создание.

Работа при расчетных суперкритических параметрах пара и давления в конденсаторе позволяет уменьшить удельный расход пара на турбину в среднем на  $\Delta d_0 \approx 0,32$  кг/(кВт·ч), что для блока 800 МВт соответствует  $\Delta D_0 \approx 0,32$  т/ч пара. Учитывая соответствующее уменьшение количества отбираемого пара на систему регенерации, снижение расхода пара в конденсатор составит около 200 т/ч. При использовании лопаток из титановых сплавов с длиной до 1200 мм это позволяет выдержать требования к ЛПС для блока 800 МВт при сохранении

двух двухпоточных ЦНД. Последнее отражается в уменьшении удельных капиталовложений и дальнейшей деградации КПД блока за счет увеличения потерь с выходной скоростью. Для сравнения сделан также расчет блока СКП 800 МВт с двумя двухпоточными ЦНД, расчетная длина ЛПС для которого составила ~1120 мм, а осевая площадь выхода последней ступени и выходная скорость – соответственно ~10,43 м<sup>2</sup> и ~280 м/с (на рис. 2-4 этот вариант показан пунктирной линией). При этом получено снижение КПД блока на ~0,16 % и снижение удельных капиталовложений на ~0,44 тыс. руб./кВт.

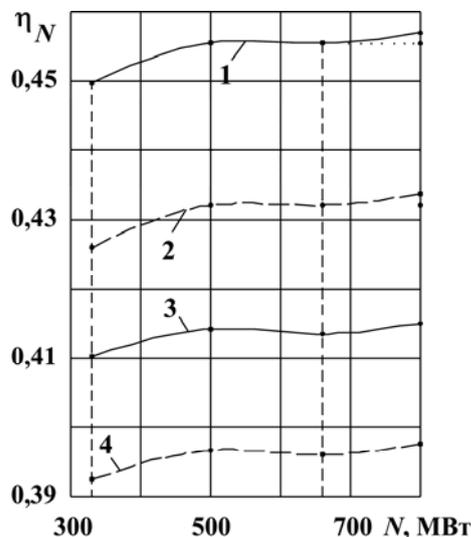


Рис. 4. КПД энергоблоков суперкритических параметров с системами серо- и азотоочистки: 1, 2 – КПД брутто и нетто для энергоблоков СКП; 3, 4 – КПД брутто и нетто для энергоблоков СКД

В заключение следует отметить, что существенный потенциал для увеличения эффективности энергоблока хранится в конфигурации хвостовой части котла. Дальнейшее увеличение КПД можно получить при переходе к схеме со сбросом дымовых газов в атмосферу через испарительную градирню с естественной тягой, что не требует дополнительного подогрева очищенных от оксидов серы газов выше точки росы, а следовательно позволяет использовать тепло неочищенного потока в системе регенерации турбины или для вытеснения отборов пара на калориферы.

Подобные схемы реализованы на лучших станциях Германии, таких как ТЭС Niederaussem и Schwarze Pumpe, а эффект от использования этих схем достигает 0,9 % повышения эффективности производства электроэнергии [8]. Вместе с тем, выхлоп в атмосферу через градирни предъявляет более высокие требования к установкам очистки дымовых газов (эффективность более 90 %). С другой стороны, глубокая утилизация теплоты дымовых газов перед установкой сероочистки с помощью, например, технологии турбинного экономайзера влечет снижение потребления абсорбером воды, которая частично расходуется на охлаждение и насыщение потока газов.

### Выводы

1. Рассмотрены технико-экономические показатели энергоблоков суперкритических параметров с системами очистки дымовых газов. Показано, что КПД нетто таких энергоблоков находится на уровне 43 %.

2. Удельная стоимость энергоблоков СКП на кВт установленной мощности колеблется в пределах 42...52 тыс. руб./кВт, что превышает удельные капиталовложения в соответствующие блоки СКД в 1,24...1,26 раз. В то же время прирост удельных капиталовложений только от повышения начальных параметров пара составляет около 16...17,5 % от стоимости блоков СКД.

3. Рассчитаны расходные и конструктивно-компоновочные параметры систем очистки, определяющие их профиль. Удельные капиталовложения в серо- и азотоочистку суммарно составляют 6...7 % от удельных капиталовложений в целом в энергоблок суперкритических параметров.

4. Эффективным профилем новых высокоэкономичных энергоблоков является схема с многоцилиндровой турбиной, десятью подогревателями системы регенерации, 2...3 реакторами СКВ и одним абсорбером системы сероочистки.

#### Summary

*This paper considers performance characteristics of the next-generation thermal power plants with desulfurization and denitrification systems. The results given here show that the net efficiency of such plants is at the level of 43 %. The paper also provides estimation results of total plant costs, primary and auxiliary equipment costs and design parameters of SCR reactors and WFGD absorbers.*

*Key words: ultra-supercritical parameters, advanced plants, plant efficiency, flue-gas treatment, desulfurization, denitrification; total plant cost.*

#### Литература

1. Integrated Pollution Prevention and Control // Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants. July 2006. European IPPC Bureau. Seville, Spain.

2. Steam/its generation and use / Editors: John B. Kitto and Steven C. Stultz. – 41<sup>st</sup> edition. – The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, U.S.A., 2005.

3. Thermoflow 18 // THERMOFLOW Inc. – 29 Hudson Road. Sudbury, MA 01776, USA.

4. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями: Монография / П.А. Щинников, Г.В. Ноздренко, В.Г. Томилов и др. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. 528 с. (Серия «Монографии НГТУ»).

5. Тумановский А.Г., Шварц А.Л., Туголуков Е.А. и др. Пылеугольный котел для энергоблока нового поколения на суперкритические параметры пара // Теплоэнергетика. 2009. № 6. С. 2-9.

6. О целесообразном уровне параметров для угольных энергоблоков следующего поколения: Доклад ВТИ для НТС РАО «ЕЭС России» / А.Г. Тумановский, А.Л. Шварц, Г.Д. Авруцкий, В.И. Гладштейн. – Москва, 2006.

7. Тумановский А.Г., Алтухов М.Ю., Шварц А.Л. и др. Разработка пылеугольного энергоблока на суперкритические параметры пара мощностью 660 МВт // Электрические станции. 2010. № 1. С. 18-27.

8. FOSSIL FUEL-FIRED POWER GENERATION: Case Studies of Recently Constructed Coal- and Gas-Fired Power Plants / International Energy Agency. – OECD/IEA, 2007.

Поступила в редакцию

7 мая 2010 года

*Ноздренко Геннадий Васильевич* – д-р техн. наук, академик Международной Энергетической Академии, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Тепловые электрические станции» (ТЭС) Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Тел: 8 (383) 346-11-42. E-mail: tes.nstu@gmail.com.

*Русских Евгений Евгеньевич* – канд. техн. наук, начальник отдела перспективного развития ЗАО «Е4-СибКОТЭС». Тел.: 8 (383) 3-358-358. E-mail: russkih@cotes.ru.

*Шепель Виталий Сергеевич* – инженер ЗАО «Е4-СибКОТЭС». Тел.: 8 (383) 335-83-58. E-mail: shepel@cotes.ru.