

ШЕПЕЛЬ

Виталий Сергеевич

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОБЛОКОВ
С СУПЕРКРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ И УСТАНОВКАМИ
СЕРО- И АЗОТООЧИСТКИ**

Специальность 05.14.14 – тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Ноздренко Геннадий Васильевич

Официальные оппоненты: **Лебедев Виталий Матвеевич**,
доктор технических наук, профессор, Омский
государственный университет путей
сообщения, профессор кафедры
теплоэнергетики

Потанина Юлия Михайловна,
кандидат технических наук, ФГБУН Институт
систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО
РАН, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина

Защита диссертации состоится «06» декабря 2013 года в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета

Автореферат разослан «05» ноября 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Чичиндаев Александр Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Стратегиями развития энергетики России предусмотрено повышение доли угольной генерации на тепловых электростанциях. Для обеспечения конкурентоспособности твердого топлива необходимо повысить КПД теплосиловых установок и решить ряд проблем в области чистых угольных технологий. Одним из приоритетных направлений электроэнергетики являются пылеугольные конденсационные энергоблоки с суперкритическими параметрами (СКП) пара и установками глубокой очистки дымовых газов.

Вопросам создания в России энергоблоков СКП, материалов и оборудования для них посвящены работы А. Г. Тумановского, Л. А. Хоменок, А. Г. Костюка, А. Д. Трухня, А. Л. Шварца, В. И. Гладштейна, В. Н. Скоробогатых, Р. О. Кайбышева и др. Выбор параметров для паросилового цикла в данных работах определяется характеристиками жаропрочности новых аустенитных и мартенситных сталей, а в качестве основных показателей эффективности новых блоков используются основные технико-экономические показатели, такие как электрический КПД и удельный расход топлива.

Недостатком применяемых сегодня методик и рассчитанных на их основе показателей технико-экономической и коммерческой эффективности является невозможность учета системных факторов, среди которых: надежность энергоснабжения, затраты на создание и работу аварийного резерва в энергосистеме, установленная мощность энергосистемы, затраты в экологическую, социальную и производственную инфраструктуры и пр. В связи с этим принятие решения о введении энергоблока СКП в ту или иную энергосистему на основе этих показателей повышает риск перерасхода затрат.

Поэтому проведение комплексных технико-экономических исследований пылеугольных конденсационных энергоблоков с суперкритическими параметрами и установками глубокой очистки дымовых газов от оксидов серы и азота является **актуальным**.

Целью диссертации является технико-экономическое исследование на основе математического моделирования и проведения схемно-параметрической оптимизации энергоблоков, работающих на сибирских углях, с суперкритическими параметрами и установками серо- и азотоочистки.

Задачи исследования:

1. Разработать методику математического моделирования пылеугольных конденсационных энергоблоков СКП с системами серо- и азотоочистки и математическую модель их функционирования в энергосистеме при комплексном

учете основных системных факторов: надежности энергоснабжения, затрат на создание и работу аварийного резерва в энергосистеме, установленной мощности энергосистемы, затрат в экологическую, социальную и производственную инфраструктуры, числа часов использования установленной мощности, стоимости топлива, тарифов на электроэнергию, характеристик сибирских углей.

2. Разработать на основе проведенной схемно-параметрической оптимизации эффективные технологические схемы энергоблоков СКП 330, 500, 660, 800 МВт с системами очистки дымовых газов.

3. Выполнить комплексные технико-экономические исследования энергоблоков СКП 330, 500, 660, 800 МВт, работающих на сибирских углях, и определить их оптимальные расходно-термодинамические и технико-экономические параметры, конструктивно-компоновочные параметры систем очистки дымовых газов.

4. Разработать на основе результатов комплексного оптимизационного технико-экономического исследования рекомендации по выбору рациональных схем и расходно-термодинамических параметров для энергоблоков СКП, конструктивно-компоновочных параметров систем очистки дымовых газов.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые получены и выносятся на защиту следующие наиболее важные результаты:

1. Разработанные методика математического моделирования пылеугольных конденсационных энергоблоков СКП с системами серо- и азотоочистки и математическая модель их функционирования в энергосистеме при комплексном учете основных системных факторов: надежности энергоснабжения, затрат на создание и работу аварийного резерва в энергосистеме, установленной мощности энергосистемы, затрат в экологическую, социальную и производственную инфраструктуры, числа часов использования установленной мощности, стоимости топлива, тарифов на электроэнергию, характеристик сибирских углей.

2. Эффективные технологические схемы (на одну из которых получен патент РФ № 130626) энергоблоков СКП 330, 500, 660, 800 МВт с системами очистки дымовых газов, разработанные на основе проведенной схемно-параметрической оптимизации.

3. Оптимальные расходно-термодинамические и технико-экономические параметры энергоблоков СКП 330, 500, 660, 800 МВт, работающих на сибирских углях, конструктивно-компоновочные параметры систем очистки дымовых газов, определенные на базе комплексного технико-экономического исследования.

4. Разработанные на основе результатов комплексного оптимизационного технико-экономического исследования рекомендации по выбору рациональных схем и расходно-термодинамических параметров для энергоблоков СКП, конструктивно-компоновочных параметров систем очистки дымовых газов.

Практическая значимость и использование результатов работы. Разработанная методика, математическая модель и реализованная на этой основе программа расчета позволяют получать оптимальные схемно-параметрические решения для угольных энергоблоков СКП при комплексном учете системных факторов. Полученные результаты технико-экономического исследования могут использоваться для обоснования выбора эффективных параметров и единичной мощности в проектах новых экологичных энергоблоков повышенной эффективности.

Результаты работы использованы в проектной организации ЗАО «Е4-СибКОТЭС» при разработке технико-экономического обоснования строительства новой станции мощностью 660 МВт, анализе вариантов совершенствования тепловой схемы блока 800 МВт, при обосновании решений по реконструкции выработавших парковый ресурс конденсационных энергоблоков мощностью 300 МВт и в учебных курсах по тепловым электростанциям для студентов энергетического факультета НГТУ.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертационной работы обосновывается использованием апробированных методик расчета тепловых схем энергоблоков, фундаментальных закономерностей технической термодинамики, теплопередачи, теории надёжности. Математические модели и компьютерное моделирование энергоблоков СКП базируются на методах, апробированных и хорошо себя зарекомендовавших на решении ряда других задач подобного класса.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: XI и XII Всероссийские студенческие научно-технические семинары (Томск, 2009, 2010 г.); научная студенческая конференция «Дни науки НГТУ-2009» (Новосибирск); Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2009, 2010 г.); первый международный научно-технический конгресс «Энергетика в глобальном мире» (Красноярск, 2010 г.); вторая научно-практическая конференция с международным участием «Инновационная энергетика 2010» (Новосибирск); конкурс молодых специалистов ЗАО «Е4-СибКОТЭС» (Новосибирск,

2011 г.); VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива» (Новосибирск, 2012 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 2 научные статьи – в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, один патент РФ, 9 работ, опубликованных в сборниках международных и всероссийских конференций.

Личный вклад автора. Постановка задач исследования, методика схемно-параметрической оптимизации энергоблоков СКП выполнены совместно с научным руководителем. Самостоятельно автором разработаны математические модели функционирования энергоблоков СКП с системами очистки и модели расчетов показателей технико-экономической эффективности. С использованием этих моделей автором самостоятельно проведены комплексные оптимизационные исследования и разработаны рекомендации по выбору рациональных схем и расходно-термодинамических параметров для энергоблоков СКП с системами очистки дымовых газов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Работа содержит 111 страниц основного текста, 18 рисунков и 24 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследования, отмечены элементы новизны полученных результатов и практическая значимость работы, аннотируются основные положения работы.

В первой главе рассматриваются проблемы и предпосылки создания экологичных угольных энергоблоков на суперкритические параметры пара, обосновывается актуальность проведения комплексных технико-экономических исследований для таких энергоблоков, анализируется технологическая готовность отечественных заводов к созданию оборудования для блоков СКП. Выполнен обзор технологий очистки дымовых газов от оксидов серы и азота, отмечены технологии, обладающие высокой технологической готовностью и способные обеспечить глубокую степень очистки.

На основании проведенного анализа сформулированы задачи исследования.

1. Разработать методику математического моделирования пылеугольных конденсационных энергоблоков СКП с системами серо- и азотоочистки и мате-

математическую модель их функционирования в энергосистеме при комплексном учете основных системных факторов: надежности энергоснабжения, затрат на создание и работу аварийного резерва в энергосистеме, установленной мощности энергосистемы, затрат в экологическую, социальную и производственную инфраструктуру, числа часов использования установленной мощности, стоимости топлива, тарифов на электроэнергию, характеристик сибирских углей.

2. Разработать на основе проведённой схемно-параметрической оптимизации эффективные технологические схемы энергоблоков СКП 330, 500, 660, 800 МВт с системами очистки дымовых газов.

3. Выполнить комплексные технико-экономические исследования энергоблоков СКП 330, 500, 660, 800 МВт, работающих на сибирских углях, и определить их оптимальные расходно-термодинамические и технико-экономические параметры, конструктивно-компоновочные параметры систем очистки дымовых газов.

4. Разработать на основе результатов комплексного оптимизационного технико-экономического исследования рекомендации по выбору рациональных схем и расходно-термодинамических параметров для энергоблоков СКП, конструктивно-компоновочных параметров систем очистки дымовых газов.

Во **второй главе** приведена разработанная методика комплексных технико-экономических исследований энергоблоков СКП с установками очистки дымовых газов.

Главной задачей разработанного подхода является формирование и обоснование представительного состава показателей и технико-экономического критерия эффективности и их оценка при наивыгоднейшем сочетании термодинамических, расходных, конструктивных, компоновочных параметров и вида технологической схемы и выполнении всех внешних и внутренних ограничений на сооружение и функционирование. При этом под внутренними понимаются ограничения внутрициклового и конструктивно-компоновочного характера, а под внешними – ограничения по связям с энергосистемой (включая режимные особенности функционирования), ТЭК, экологической и социальной инфраструктур.

Во-первых, это – условное разбиение энергоблока на несколько функционирующих частей (парогенерирующую часть, часть высокого давления турбины, часть среднего и низкого давления турбины, система регенерации и технического водоснабжения и т.п.). Во-вторых – математическое описание (моделирование) функционирования и использование этой модели при расчетах в вычислительном комплексе, имитирующем работу энергоблока. В-третьих – оптими-

зация параметров функционирования по условиям действия ограничивающих факторов. В-четвертых – определение и анализ энергетических показателей и технико-экономических критериев эффективности в сравниваемых вариантах.

При комплексном исследовании энергоблоков СКП сравнение и отбор наилучших вариантов производится по критерию технико-экономической эффективности, в качестве которого применено вероятностное значение относительной эффективности эксплуатации инвестиций (пессимистическая оценка):

$$\tilde{\eta}_Z = M_G[\eta_Z] - \Delta\eta_Z,$$

где $\Delta\eta_Z = v\sqrt{D_G[\eta_Z]}$; M_G, D_G – математическое ожидание и дисперсия случайной функции η_Z ; G – множество внешних связей и исходных данных с известными законами распределения случайных компонент; v – коэффициент, характеризующий расчетный уровень достоверности определения $\tilde{\eta}_Z$,

$$\eta_Z = \frac{S}{3} = \frac{\left[\sum_{\tau=0}^{\tau_p} S_{\tau} (1 + E_D)^{-\tau} \right] \frac{1}{\tau_p}}{\left[\sum_{\tau=0}^{\tau_p} 3_{\tau} (1 + E_D)^{-\tau} \right] \frac{1}{\tau_p}}.$$

Здесь S и 3 определяются как среднегодовые значения соответственно совокупного дохода и всех видов расходов за весь срок жизни τ_p с учетом фактора времени, E_D – ставка дисконтирования.

Эксплуатационные затраты, приведенные к одному году, определяются по выражению:

$$3 = B \cdot Ц_T + \sum \sigma_r K_r + \sum \Delta 3,$$

где B – годовой расход топлива энергоблоком СКП; K_r – капиталовложения в r -е оборудование; $\Delta 3$ – поправка к годовым затратам, учитывающая приведение вариантов к сопоставимому виду, что включает затраты в замещаемые энергоблоки, в обеспечение заданной надежности энергоснабжения с учетом графика нагрузки, коэффициента готовности и режимных особенностей, в системы сокращения вредных выбросов, в экологическую инфраструктуру, в энергоснабжение дальних потребителей, в производственную и социально-бытовую инфраструктуру, на содержание штатного, ремонтного и эксплуатационного персонала.

Величина относительного аннуитета, характеризующая ежегодную долю капитальных затрат и включающая ежегодный возврат капиталовложений (амортизацию) и проценты по ним определяется по выражению:

$$\sigma_r = \frac{E_D(1 + E_D)^{\tau_P}}{(1 + E_D)^{\tau_P} - 1}.$$

При неопределённости исходных данных математическое ожидание капиталовложений в оборудование энергоблока СКП имеет вид:

$$\tilde{K}_r = M[K_r] = \left(\int_{K_{r1}}^{K_{r2}} K_r^0 \cdot f(K_r^0) dK_r \right) \prod \left(\int_{c_{\alpha 1}}^{c_{\alpha 2}} c_{\alpha} \cdot f(c_{\alpha}) dc_{\alpha} \right) \times \\ \times \prod \left(\int_{n_{\beta 1}}^{n_{\beta 2}} \omega_{\beta}^{n_{\beta}} \cdot f(n_{\beta}) dn_{\beta} \right),$$

где K_r^0 – базовое значение капиталовложений; c_{α} – коэффициенты приведения по параметрам и показателям, учитывающим конструктивные особенности функционирования и компоновки; ω_{β} – относительные параметры, определяющие отклонения капиталовложений от базового значения; n_{β} – показатели степенной зависимости, $f(K_r^0)$, $f(c_{\alpha})$, $f(n_{\beta})$ – законы распределения случайных переменных K_r^0 , c_{α} , n_{β} в интервалах (K_{r1}^0, K_{r2}^0) , $(c_{\alpha 1}, c_{\alpha 2})$, $(n_{\beta 1}, n_{\beta 2})$.

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 и 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. 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

$$BQ_i^f = \sum_{k \in V(i)} (\eta M^{xh})_{ki} - \sum_{j \in W(i)} (\eta M^{yh})_{ij} = 0;$$

- расходного баланса

$$B + \sum_{k \in V(i)} M_{ki}^x - \sum_{j \in W(i)} M_{ij}^y = 0.$$

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

Математическая постановка задачи схемно-параметрической оптимизации энергоблоков СКП представлена следующим образом:

$$\left\{ \min_{x \in R^n} [\tilde{\eta}_Z(x)]^{-1} [\Phi_u(\omega) = 0, u \in U] \right\},$$

где $\Phi_u(\omega)$ – вероятностный логико-числовой оператор функциональных отношений; U – множество логико-числовых операторов; $\omega = (x, y, \Gamma, G, R^n, L)$ – информационная структура; Γ – множество энергоблоков; L – множество логических управляющих параметров; G – множество внешних связей и исходных данных с известными законами распределения случайных компонент; $x_i \in X$ – независимые параметры; $y_i \in Y$ – зависимые параметры. К этим параметрам в частности относятся расходы рабочих сред, температурные напоры, передаваемые тепловые потоки, концентрации загрязняющих веществ, конструктивно-компоновочные параметры элементов оборудования, массо-стоимостные характеристики, и т.д. Многомерное вещественное пространство R^n включает множество независимых X и зависимых Y параметров:

$$R^n = \left\{ X, Y \mid H(X, Y) = 0, F(X, Y) \geq 0, X^* \leq X \leq X^{**} \right\},$$

где H, F – нелинейные вектор-функции ограничений в форме равенств (уравнения энергетического и расходного балансов, теплопередачи и др.) и в форме неравенств; X^*, X^{**} – векторы наименьших и наибольших значений.

Минимум целевой функции находится методом случайного направления поиска с учетом ограничений и условий:

- допустимая область пространства R^n замкнута;
- функции $\tilde{\eta}_Z(x), H(x, y), F(x, y)$ являются непрерывными и дифференцируемыми в допустимой области;

- допустимая область в пространстве R^n не пуста.

Третья глава содержит основные схемно-параметрические решения для энергоблоков СКП с системами мокрой известняковой очистки от оксидов серы и селективного каталитического восстановления оксидов азота.

Рассмотрены энергоблоки СКП мощностью 330, 500, 660, 800 МВт с сверхкритическими параметрами 28,4 МПа / 600°C / 600°C, температурой питательной воды 306°C, давлением в конденсаторе 3,5 кПа (рис. 1). Полученные для энергоблоков параметры систем очистки дымовых газов приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что системы серо- и азотоочистки удовлетворяют современным требованиям к экологичности пылеугольных энергоблоков.

Для мощностей энергоблоков 330...800 МВт количество реакторов СКВ – 2...3, абсорберов сероочистки – 1 на энергоблок. Удельные капиталовложения в серо- и азотоочистку суммарно достигают примерно 7% от удельных капиталовложений в целом в энергоблок СКП на кузнецком угле марок Г, Д (рис. 2). Вместе с тем можно отметить, что по сравнению со стандартными энергоблоками сверхкритического давления (СКД) удельные капиталовложения в энергоблоки СКП с системами очистки примерно в 1,14 раз больше.

Перегиб кривой $k_A^{СКП}$ характеризует переход к трем реакторам СКВ для блока 660 МВт вместо двух для блоков 330 и 500 МВт.

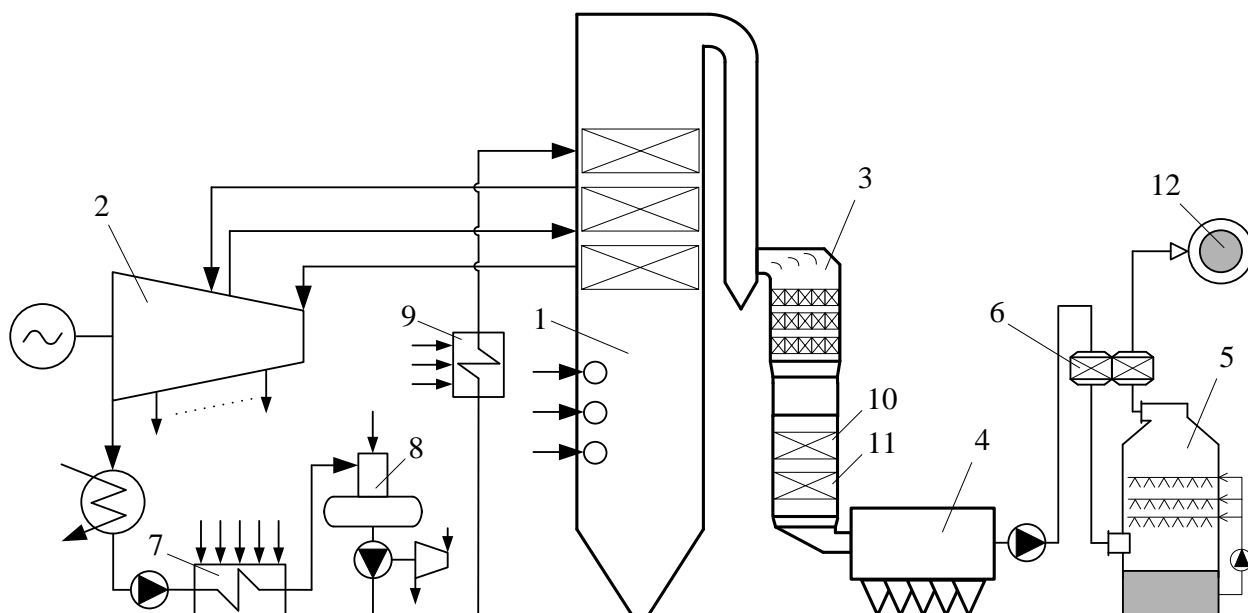


Рис. 1. Принципиальная схема энергоблока СКП с системами серо- и азотоочистки:
 1 – котел; 2 – многоцилиндровая турбина; 3 – реактор СКВ; 4 – электрофильтр; 5 – абсорбер системы сероочистки; 6 – газогазовый теплообменник (ГГТО); 7 – группа подогревателей низкого давления; 8 – деаэратор; 9 – группа подогревателей высокого давления; 10 – ТВП-2; 11 – ТВП-1; 12 – выхлоп в атмосферу.

Таблица 1

Параметры систем очистки дымовых газов

Наименование	СКП-330	СКП-500	СКП-660	СКП-800
<i>СИСТЕМА СКВ</i>				
Высота реактора, м	13,4			
Ширина реактора, м	8,3	10,2	9,5	10,5
Температура дымовых газов перед установкой, °С	348			
Концентрация NO _x на входе/на выходе, мг/м ³	600/150	600/150	600/150	600/150
Расход аммиака, т/ч	0,16	0,24	0,31	0,38
Эффективность СКВ	0,75			
Потребление электроэнергии, кВт	98	148	194	235
<i>СИСТЕМА СЕРООЧИСТКИ</i>				
Высота абсорбера, м	20,4	21,0	21,7	24,0
Диаметр абсорбера, м	12,0	14,6	16,7	18,4
Концентрация SO ₂ на входе /на выходе, мг/м ³	985/200			
Потребление известняка, т/ч	1,2	2,0	2,4	3,0
Выход гипса, т/ч	2,3	3,5	4,6	5,6
Эффективность сероочистки	0,80			
Потребление электроэнергии, кВт	485	760	1022	1266

На рис. 3 показаны значения КПД энергоблоков СКП в сравнении с энергоблоками СКД. Характерные изгибы кривых КПД определяются конструктивным исполнением части низкого давления турбин, от чего зависят потери с выходной скоростью в последней ступени турбины, а соответственно и КПД энергоблока в целом.

Для блока СКП-800 МВт предусматривается конструкция турбины с двумя двухпоточными ЦНД. Расчетная длина лопатки последней ступени для блока СКП-800 составляет ~1100 мм, а осевая площадь выхода последней ступени и выходная скорость – соответственно ~10,2 м² и ~276 м/с.

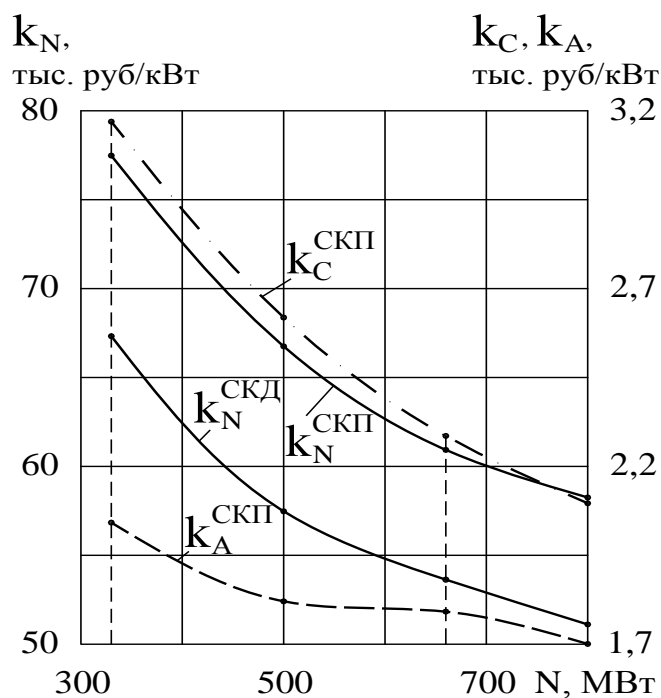


Рис. 2. Удельные капиталовложения в энергоблоки СКП:

$k_N^{СКП}$ и $k_N^{СКД}$ – в энергоблоки СКП и СКД;

$k_C^{СКП}$ и $k_A^{СКП}$ – в системы серо- и азотоочистки.

Удешевление стоимости систем очистки при переходе на повышенные параметры пара происходит за счет более высокой эффективности (а соответственно, сниженного удельного расхода топлива) энергоблоков СКП по сравнению с энергоблоками стандартных закритических параметров, кроме того снижаются расходы реагентов и потребление энергии этими системами.

Согласно выполненному анализу стоимость установок серо- и азотоочистки для энергоблока СКП мощностью 660 МВт, работающего на кузнецком угле, составляет соответственно ~93% и ~95% от их стоимостей для блока СКД.

Проведенный анализ схемных решений для энергоблоков СКП с мокрой системой сероочистки выявил резервы повышения эффективности установок. Рекомендуется схема со сбросом дымовых газов (после их глубокой очистки от оксидов серы) в атмосферу через испарительную градирню с естественной тягой, что не требует дополнительного подогрева очищенного потока газов выше точки росы, и следовательно позволяет использовать их тепло в системе регенерации турбины или для вытеснения отборов пара на калориферы. В зависимости от схемы включения турбинного экономайзера в тракт дымовых газов котла и пароводяной тракт достигимо повышение КПД энергоблока на 0,47...0,62%. Автором работы также предложена схема двухконтурной паросиловой установки, включающей дополнительный утилизационный контур производства пара для утилизации тепла уходящих газов [патент РФ №130626].

В четвертой главе представлены результаты комплексного технико-экономического исследования энергоблоков СКП.

Поиск оптимального решения выполняется для определения наибольшего экономического эффекта при функционировании энергоблока в энергосистеме, что характеризуется максимальной величиной критерия эффективности.

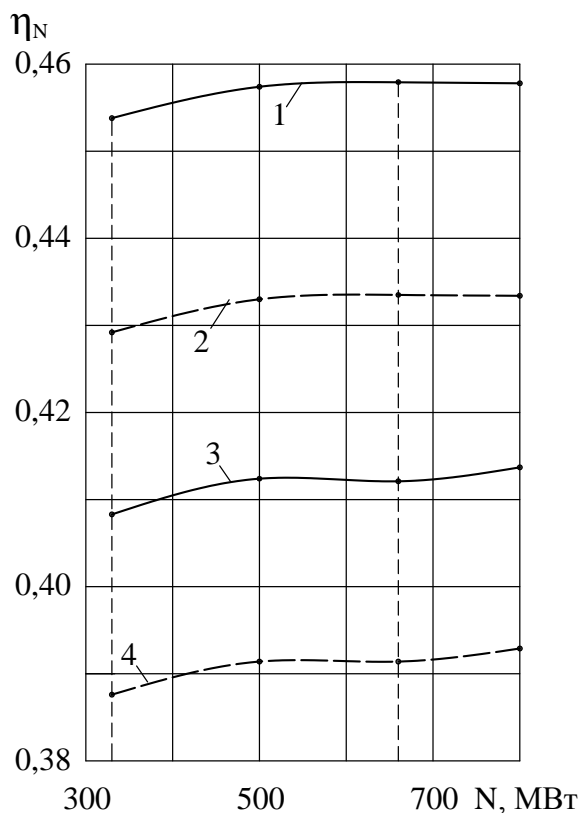


Рис. 3. КПД энергоблоков СКП с системами серо- и азотоочистки:

1 и 2 – КПД брутто и нетто для блоков СКП;
3 и 4 – КПД брутто и нетто для блоков СКД.

Согласно проведенным оптимизационным исследованиям установлено, что наибольшее влияние на эффективность того или иного варианта энергоблока имеет надежность фактор, который сильно коррелирован с принятыми для энергоблока начальными параметрами пара.

По итогам проведенных многовариантных оптимизационных расчетов получен устойчивый максимум критерия эффективности при параметрах энергоблока 24 МПа / 566°C / 591°C, для которых предполагается использование новых аустенитных сталей типа TP347HFG, SUPER304H, HR3C в пароперегревателях котлов. Среди решений задачи оптимизации следует также выделить устойчивый локальный максимум, которому соответствуют начальные параметры энергоблока 28 МПа / 620°C / 625°C и который обусловлен использованием для выходных ступеней первичного пароперегревателя перспективных высокожаропрочных сплавов на основе никеля, повышающих надежность работы энергоблока.

С учетом технологической освоенности новых аустенитных сталей, подтвержденной мировым опытом, *первая ступень* параметров 24 МПа / 566°C / 591°C рекомендуется как наиболее целесообразная для разрабатываемых сегодня в России энергоблоков СКП. Сочетание параметров пара 28 МПа / 620°C / 625°C следует рассматривать как следующую ступень (*вторую ступень*), рекомендованную для освоения в будущем.

Для каждого энергоблока (мощностью 330, 500, 660 и 800 МВт) были выполнены оптимизационные расчеты при введении его в различные энергосистемы установленной мощностью от 2 до 15 ГВт. На рис. 4 показан характерный график зависимости критерия эффективности от установленной мощности энергосистемы для блока СКП-660 МВт.

Было также изучено влияние изменения числа часов использования установленной мощности энергоблока (τ_N), изменения стоимости угля ($\pm 25\%$), тарифа на электроэнергию ($\pm 25\%$), удельных капиталовложений в резервные установки в энергосистеме ($\pm 25\%$) и стоимости резервного топлива ($\pm 25\%$). Полученные оптимизированные значения подтверждают устойчивость предлагаемых ступеней параметров и определяют диапазон их эффективных значений (табл. 2).

Расчеты подтверждают, что целесообразность применения повышенных параметров растет с увеличением установленной мощности энергосистемы, в которой планируется строительство энергоблока нового поколения, а также при увеличении единичной мощности энергоблока. При допустимой доле резерва в энергосистеме не более 22% строительство блоков СКП мощностью 330 МВт

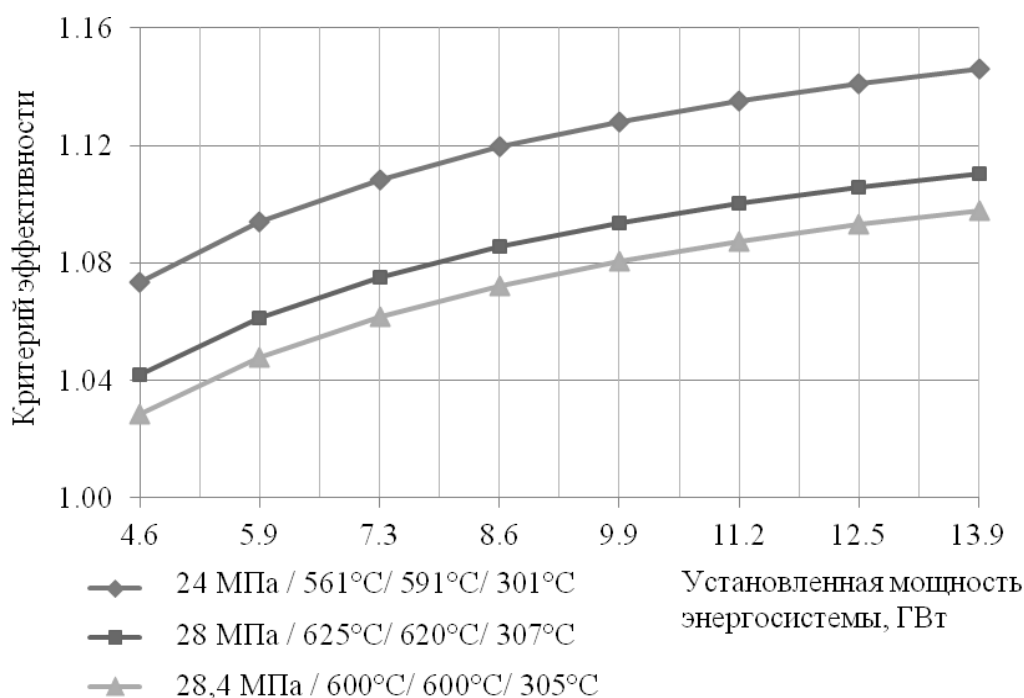


Рис. 4. Влияние установленной мощности энергосистемы на технико-экономический критерий эффективности для энергоблока 660 МВт

Таблица 2

Рекомендованные параметры для блоков СКП

Параметр	Первая ступень СКП (аустенитные стали)	Вторая ступень СКП (никелевые сплавы)
Давление свежего пара, МПа	24..25	28...29
Температура свежего пара, °С	565...570	620...625
Температура пара промперегрева, °С	590...595	620...630
Температура питательной воды, °С	300...305	305...310

становится эффективным в энергосистемах с установленной мощностью от 4,5 ГВт, блоков 500 МВт – в энергосистемах от 8 ГВт, блоков 660 МВт – в энергосистемах от 12 ГВт, блоки 800 МВт не рекомендуются к установке.

Для предлагаемых ступеней параметров был выполнен всесторонний анализ влияния основных факторов на технико-экономические показатели энергоблока: 1. для обеих ступеней характерна сильная зависимость стоимости энергоблока от начального давления пара; 2. для ступени параметров 28 МПа / 620°C / 625°C не рекомендуется повышение температуры промперегрева выше 630°C, меньшая температура позволяет использовать для промежуточного пароперегревателя аустенитные стали; 3. повышение температуры питательной воды выше рекомендованных для ступеней значений приводит к повышению удель-

ного расхода пара на турбину, что влечет стремительное увеличение металлоемкости и капиталовложений в энергоблок; 4. для первых проектов энергоблоков СКП с повышением параметров свежего пара более 31 МПа и 620°С в целях снижения капитальных затрат возможно рассмотрение компромиссной тепловой схемы энергоблока с двумя ПВД и температурой питательной воды на уровне 270...280°С.

Капиталовложения в основное оборудование блоков СКП k_O составляют около 40% от капиталовложений в энергоблок в целом (рис. 5). Значительная доля (до 25%) приходится на затраты на вспомогательные системы и агрегаты ТЭС $k_{ВС}$ (на системы водоподготовки, техводоснабжения, топливоподдачи, общестанционное оборудование и пр.) и затраты $k_{СМ}$ (около 21...23%) на строительно-монтажные работы, подготовку территории, создание транспортной инфраструктуры. Проектно-изыскательские и пусконаладочные работы, а также прочие затраты составляют остальные расходы.

Анализ технико-экономической эффективности энергоблоков СКП с системами очистки на основе принятых сегодня коммерческих методик показал достаточную привлекательность их сооружения. На рис. 6 и 7 показаны соответственно структура себестоимости электроэнергии энергоблока СКП 660 МВт и график его окупаемости. При условии реализации мощности по договору о предоставлении мощности (ДПМ) расчетный дисконтированный срок окупаемости энергоблока составляет ~12,4 лет, чистый дисконтированный доход (ЧДД/NPV) – на уровне ~14000 млн. руб., а внутренняя норма доходности (ВНД/IRR) достигает 18%. На рис. 8 показана чувствительность ЧДД (NPV) к внешним условиям, среди которых: объем капиталовложений, цена электроэнергии на ранке на сутки вперед

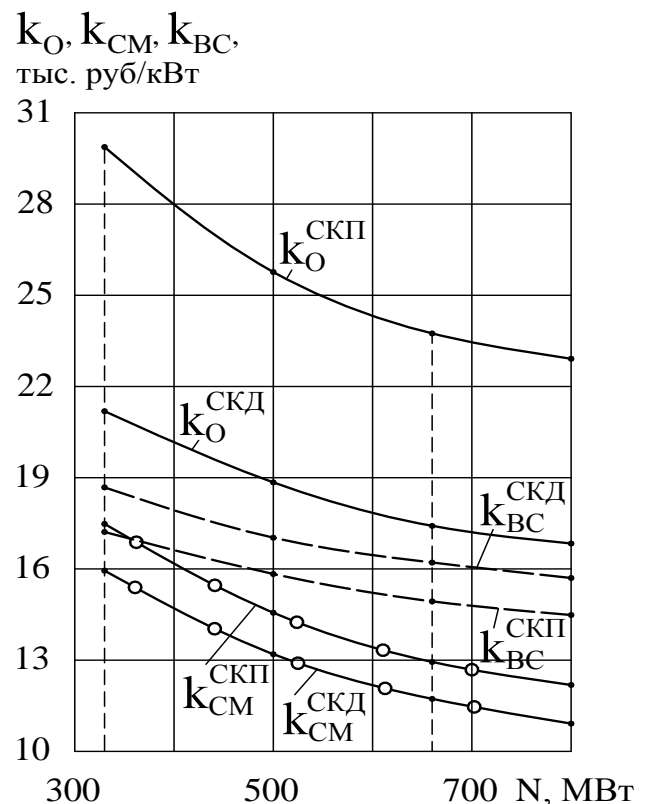


Рис. 5. Удельные затраты в энергоблоках СКП: k_O , $k_{ВС}$, $k_{СМ}$ – удельные капиталовложения в основное оборудование, вспомогательные системы и агрегаты, затраты на строительно-монтажные работы

(РСВ), цена мощности по ДПМ и цена угля. Перечисленные показатели наиболее чувствительны к изменению объема капиталовложений.

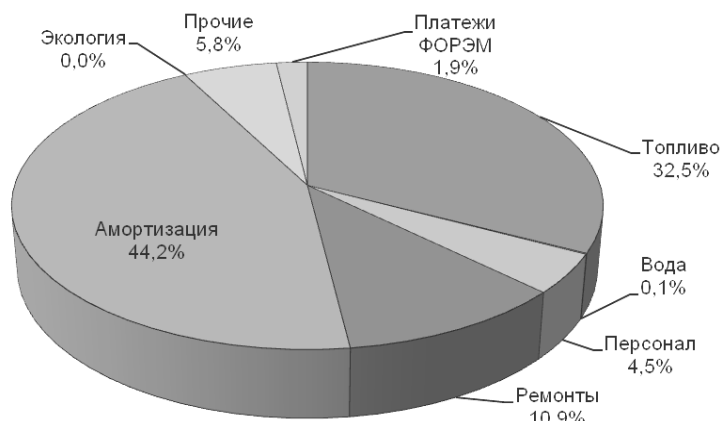


Рис. 6. Структура себестоимости электроэнергии для блока СКП-660

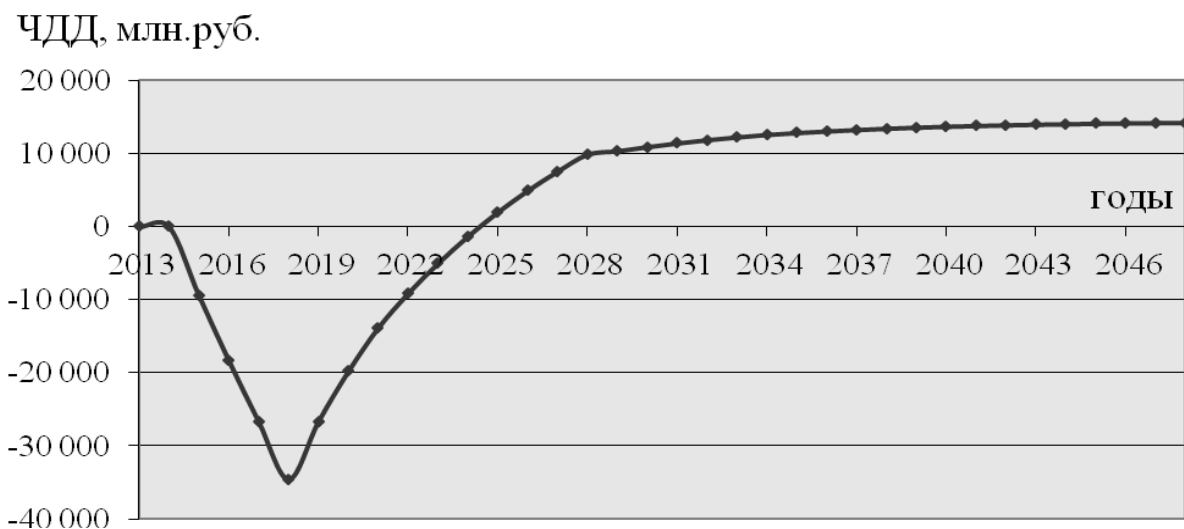


Рис. 7. График окупаемости для блока СКП-660

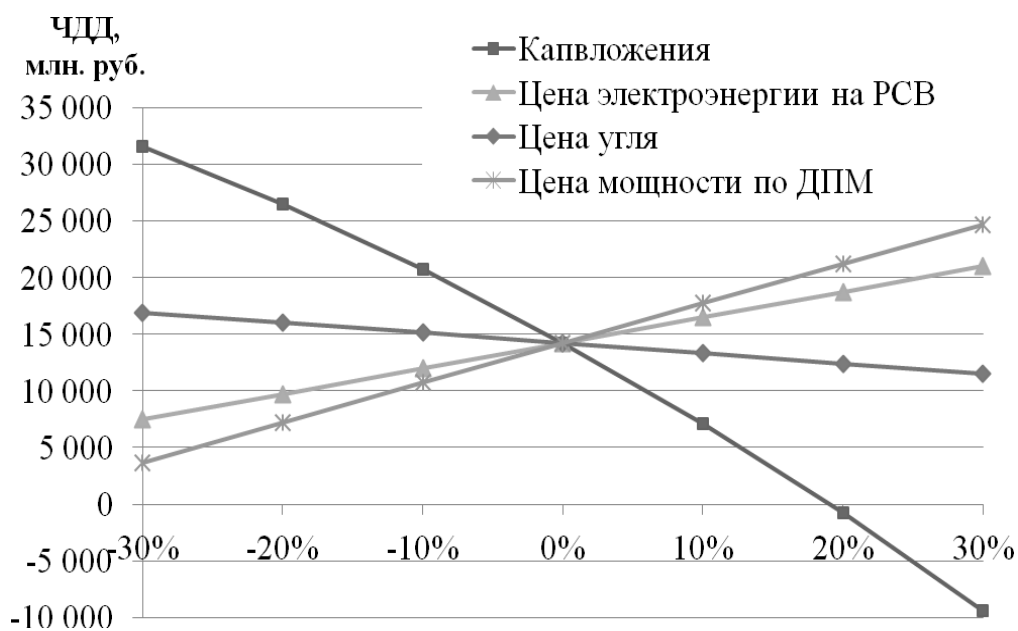


Рис. 8. Чувствительность показателей блока СКП-660 к изменению внешних условий

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны методика математического моделирования пылеугольных конденсационных энергоблоков СКП с системами серо- и азотоочистки и математическая модель их функционирования в энергосистеме при комплексном учете основных системных факторов: надежности энергоснабжения, затрат на создание и работу аварийного резерва в энергосистеме, установленной мощности энергосистемы, затрат в экологическую, социальную и производственную инфраструктуры, числа часов использования установленной мощности, стоимости топлива, тарифов на электроэнергию, характеристик сибирских углей.

2. Изложены разработанные методические подходы к учёту особенностей расчета тепловой схемы энергоблоков СКП, к оптимизации расходно-термодинамических и технико-экономических параметров и расчету показателей технико-экономической эффективности проекта строительства энергоблока СКП.

3. Разработаны на основе проведённой схемно-параметрической оптимизации эффективные технологические схемы (на одну из которых получен патент РФ № 130626) энергоблоков СКП 330, 500, 660, 800 МВт с системами очистки дымовых газов. Эффективным профилем новых высокоэкономичных энергоблоков является схема с многоцилиндровой турбиной, девятью отборами на систему регенерации, 2...3 реакторами СКВ, одним абсорбером системы сероочистки и градирней с совмещенным каналом для отвода дымовых газов. КПД нетто таких энергоблоков находится на уровне 43...44%.

4. Определены на базе комплексного технико-экономического исследования оптимальные расходно-термодинамические параметры энергоблоков СКП 330, 500, 660, 800 МВт, работающих на сибирских углях, конструктивно-компоновочные параметры известняковой системы очистки дымовых газов от оксидов серы и установки селективного каталитического восстановления оксидов азота. Показано, что для энергоблоков 330...800 МВт эффективны параметры 28,4 МПа / 600°C / 600°C, температура питательной воды 306°C, давление в конденсаторе 3,5 кПа. При сбросе дымовых газов через градирню для энергоблоков, работающих на кузнецких углях, достигается повышение КПД на 0,62%. Удельные капиталовложения в серо- и азотоочистку суммарно составляют 6...7% от удельных капиталовложений в целом в энергоблок СКП. КПД системы азотоочистки – 0,75, сероочистки – 0,80.

5. Определены на базе комплексного технико-экономического исследования технико-экономические параметры энергоблоков СКП 330, 500, 660,

800 МВт, работающих на сибирских углях. Удельные капиталовложения в энергоблоки СКП – 58...78 тыс. руб./кВт, что в 1,14...1,15 раза больше, чем в соответствующие энергоблоки СКД. Себестоимость электроэнергии – на уровне 1 руб./(кВт·ч). При варьировании ценовых показателей на 30% (удельных капиталовложений, стоимости топлива, стоимости электроэнергии на ФОРЭМ и мощности по ДПМ), числа часов использования установленной мощности и ставки дисконтирования внутренняя норма доходности изменяется в пределах 9...22%, дисконтированный срок окупаемости – 8,5...17,4 лет.

6. Для угольных конденсационных энергоблоков СКП обоснована новая оптимальная ступень параметров пара: 24,0 МПа/ 566°С /591°С. Сочетание параметров пара 28 МПа / 620°С / 625°С следует рассматривать как следующую ступень (вторую ступень) параметров для освоения в будущем.

Показано, что строительство энергоблоков мощностью 330 МВт становится эффективным в энергосистемах с установленной мощностью от 4,5 ГВт, энергоблоков 500 МВт – в энергосистемах от 8 ГВт, энергоблоков 660 МВт – в энергосистемах от 12 ГВт, энергоблоки 800 МВт не рекомендуются к установке.

7. Совокупность полученных в диссертации результатов составляет научную основу технико-экономических исследований энергоблоков с суперкритическими параметрами и установками серо- и азотоочистки. Результаты теоретических и прикладных исследований используются в ЗАО «Е4-СибКОТЭС», в учебном процессе НГТУ.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

Статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК

1. Шепель В.С., Ноздренко Г.В., Русских Е.Е. Техничко-экономические показатели перспективных энергоблоков ТЭС суперкритических параметров с системами серо- и азотоочистки // Проблемы энергетики. – 2011. – №1-2. – С. 28-37.

2. Шепель В.С., Ноздренко Г.В., Русских Е.Е. Обоснование рационального профиля энергоблока с суперкритическими параметрами пара и установками серо и азотоочистки // Научный вестник НГТУ. – 2011. – №1(42). – С. 131-138.

Публикации в журналах и сборниках трудов, патенты

3. Шепель В.С., Ноздренко Г.В., Щинников П.А. Паросиловая установка : пат. 130626 Рос. Федерация. Патентообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ, ЗАО «Е4-СибКОТЭС» – № 2012129805/06 ; заявл. 13.07.12 ; опубл. 27.07.13, Бюл. № 21. – 3 с.

4. Шепель В.С. Техничко-экономические показатели энергоблока с суперсверхкритическими параметрами и установками глубокой очистки дымовых газов / В.С. Шепель. – Энергетика и теплотехника : сб. науч. трудов / под ред. акад. РАН В. Е. Накорякова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – Вып. 14. – С. 116-125.

5. Шепель В.С., Ноздренко Г.В., Русских Е.Е. Перспективные ТЭС с энергоблоками суперкритических параметров // Академия Энергетики. – 2010. – №5 (37): Октябрь. – С. 84-87.

Материалы международных и всероссийских научных конференций

6. Шепель В.С. Техничко-экономические параметры энергоблока с установками серо- и азотоочистки // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Труды XI Всероссийского студенческого научно-технического семинара: в 2-х томах – Томск, 21-25 апреля 2009. – Томск: ТПУ, 2009 – Т. 2. Теплоэнергетическое, экологическое и гуманитарное направления. – С. 370-374.

7. Шепель В.С. Техничко-экономические показатели энергоблока суперсверхкритических параметров с установками серо- и азотоочистки // Наука. Технологии. Инновации: Материалы докладов всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. Часть 3. – С. 89-91.

8. Shepel V. Case Study on Wet Flue-Gas Desulfurization and Selective Catalytic Reduction Technologies for Coal-Fired Large Combustion Units // Proceedings of IFOST 2009. The 2009 International Forum on Strategic Technologies. – October 21-23, 2009, Ho Chi Minh City, Vietnam – Ho Chi Minh City, 2009. – P. 210-214. [Исследование технологий мокрой сероочистки и селективного каталитического восстановления для угольных энергоблоков большой мощности].

9. Шепель В.С. Угольные энергоблоки повышенной эффективности // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Труды XII Всероссийского студенческого научно-технического семинара: в 2-х томах – Томск, 21-25 апреля 2009. – Томск: ТПУ, 2010 – т. 2. Теплоэнергетическое, экологическое и гуманитарное направления. – С. 88-92.

10. Shepel V.S., Shchinnifov P.A. [and oth.]. Efficiency indexes of perspective power units of thermal power plant // ISBN 978-1-4577-0546-5. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2011 – P. 210-214. [Показатели эффективности перспективных энергоблоков тепловых электрических станций].

11. Шепель В.С. Конденсационные энергоблоки нового поколения для угольных электростанций // Наука. Технологии. Инновации: Материалы все-

российской научной конференции молодых ученых в 4-ех частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. Часть 2. – С. 33-34.

12. Шепель В.С. Исследование тепловой экономичности перспективных угольных энергоблоков конденсационных электростанций // Инновационная энергетика 2010: материалы второй научно-практической конференции с международным участием. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – С. 336-339.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс (383) 346-08-57
формат 60×84/16. Объем 1.25 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ 1416. Подписано в печать 31.10.2013 г.